VISIT…

Проф. д-р В. Шпонинг

КОНСТРУКЦИЯ И МАТЕРИАЛ СТВОЛОВ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

Перевод и редакция
доцента А. Ф. Головина

ИЗДАНИЕ
Артиллерийской академии РККА им. Дзержинского
ЛЕНИНГРАД
1937

Проф. д-р В. Швиннинг

КОНСТРУКЦИЯ И МАТЕРИАЛ СТВОЛОВ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

Перевод и редакция
доцента А. Ф. Головина

ИЗДАНИЕ
Артиллерийской академии РККА им. Дзержинского
ЛЕНИНГРАД
1937

Ответств. редактор *Головин А. Ф.* Технич. редактор *Мельникова В. Е.*

Поступило в производство 2 марта 1937 г. Подписано к печати 7 октября 1937 г.
Количество печатных листов $12^{5}/_{8}$. Количество типогр. знаков в 1 печ. л. 41100.
Количество авт. листов 12,2. Формат бумаги 60×92.

Г—№ 103277. Арт. ак. № 35. Заказ № 907.

2-я тип. Упр. ГВИЗ НКО СССР им. Клима Ворошилова (Ленинград, ул. Герцена, 1).

Оглавление

Стр.

Предисловие к переводу 5
Предисловие автора 7
Главнейшие обозначения 9
Введение 11
I. Обзор развития стволов огнестрельного оружия 13
А. Орудийные стволы . . . . . —
Б. Стволы стрелкового оружия 18
II. Устройство современных орудийных стволов 20
III. Проектирование орудийных и винтовочных стволов 28
А. Расчет напряжений и усилий в толстостенных цилиндрах . . . . . —
1. Напряжения и деформации . . . . . —
2. Условия, определяющие наступление текучести металла (теории прочности) 29
3. Приведенные напряжения 30
а) по теории наибольшей деформации . . . . . —
б) „ энергии формоизменения 33
в) сравнение теорий на основании опытных данных, полученных при статическом давлении 36
Б. Состояние орудийного ствола при действии быстро возрастающих усилий (при выстреле) 37
В. Расчет орудийных стволов по теории наибольшей деформации . . . 45
1. Однослойный ствол (моноблок) . . . . . —
2. Ствол, обладающий напряжениями в состоянии покоя (до выстрела) . . . . . —
3. Многослойные стволы 46
4. Величина натяжения 49
5. Осевые напряжения в стенке ствола 52
Г. Расчет орудийных стволов по теории энергии формоизменения . . . 54
1. Однослойный ствол (моноблок) . . . . . —
2. Многослойный ствол . . . . . —
3. Величина натяжения 59
4. Приведенные напряжения, вызванные скреплением при заданных величинах натяжений 62
5. Приведенные напряжения, вызванные скреплением, в случае $\sigma_i = 0$ 64
Д. Численный пример расчета орудийного ствола 66
1. Расчет по теории наибольшей деформации . . . . . —
2. „ „ энергии формоизменения 67
Е. Автофретаж 71

Стр.

Ж. Ляйнеры 77
1. Конический скрепленный ляйнер 78
2. Свободный ляйнер 80
3. Определение приведенных напряжений в стенке свободного ляйнера 81
4. Приведенные напряжения в стенке конического ляйнера, вставленного с натяжением 86
З. Теоретическое исследование прочности орудийного ствола и его проектирование 87
И. Устройство ствола 92
1. Длина ствола . . . . . —
2. Нарезка 94
3. Камора 97
4. Затворная часть 101
а) клиновый затвор . . . . . —
б) поршневой затвор 103
К. Заключение 104
IV. Исследование износа стволов огнестрельного оружия . . . 105
А. Общие соображения . . . . . —
Б. Винтовочные и пулеметные стволы 106
1. Явление износа . . . . . —
2. Возникновение и ход развития износа 108
3. Конструкция пули и трение 111
4. О влиянии высокой температуры нагрева поверхности канала . 120
5. Влияние пороха. Теплоотдача пороховых газов 122
6. Охлаждение ствола 123
7. Материал для изготовления стволов стрелкового оружия . . . 125
В. Износ орудийных стволов 129
1. Явления разрушения поверхности канала . . . . . —
2. Металлографическое исследование 134
3. Образование трещин 137
4. Разрушение поверхности канала вследствие эрозии 149
5. Прорыв газов и порох 151
6. Значение теплопроводности 156
7. Износ и нарезка 157
Г. Заключение 162
V. Материал для изготовления стволов и его отношение к действию ненормально высокого давления газов 166
А. Общие соображения . . . . . —
Б. Деформирование ствола вследствие повышенного давления газов . . 167
1. Хрупкий излом 168
2. Конструктивные мероприятия 169
3. Испытания на хрупкий разрыв образцов с надрезом . . . . —
4. Проведение ударных испытаний 171
В. Материал для изготовления стволов и его обработка 176
1. Углеродистая сталь . . . . . —
2. Влияние марганца, кремния и хрома на свойства конструкционной стали 177
3. Никелевая сталь 180
4. Влияние методов изготовления и обработки стали 189
5. Влияние неправильной термической обработки 192
6. Влияние неоднородности материала и местных пороков 194
Г. Заключение 199
Предметный указатель 201

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРЕВОДУ

Труд В. Швиннинга представляет собой монографию, посвященную вопросу прочности и живучести стволов огнестрельного оружия. Как указывает автор, книга имеет своим назначением восполнение пробела, образовавшегося в немецкой артиллерийской литературе вследствие того, что известное капитальное сочинение по проектированию орудийных стволов Г. Кайзера, изданное в 1900 г., частично устарело.

Автор монографии — крупный специалист в области металловедения, известный своими работами по изучению поведения металлов в условиях воздействия динамических усилий, циклических напряжений переменного знака (усталость) и нагрева, т. е. именно тех факторов, которые являются специфичными для работы ствольного материала. Это обстоятельство нашло отражение в том, что все содержание книги, и в частности раздел проектирования стволов, излагается в теснейшей связи с физической стороной рассматриваемых вопросов и с данными практики. В отделе, относящемся к расчету стволов, наряду с общепринятым способом, основанным на теории наибольшей деформации, автор впервые в артиллерийской литературе дает метод расчета по теории энергии формоизменения, которая, согласно новейшим исследованиям, приводит к наиболее близким к действительности результатам в случае статического внутреннего давления.

Другой положительной особенностью монографии является большое внимание, уделенное вопросам износа стволов. Крупное место, отведенное этому разделу, находится в соответствии с актуальностью проблемы живучести современной артиллерии, вполне отвечая громадному практическому значению данного вопроса.

Крупный интерес представляет также последний раздел книги, посвященный выбору сталей и оценке их в качестве материала для изготовления как орудийных стволов, так и стволов стрелкового оружия. Предлагаемая автором трактовка вопроса об условиях и характере разрушения материала стволов в случаях аварийного порядка обоснована

данными современного металловедения и сопоставлена с результатами специальных испытаний в виде так называемой „взрывной пробы" цилиндров.

При составлении монографии автором использован большой собственный экспериментальный материал и ряд данных, почерпнутых из немецких, американских и французских источников.

К недостаткам монографии следует отнести чрезмерную сжатость изложения некоторых существенных вопросов орудийного дела и встречающиеся в отдельных местах книги недоговоренности и умолчания. Так, например, вопрос о затворах и других конструктивных деталях стволов затронут лишь в поверхностной форме; вопрос об автофретаже дается лишь в общих чертах; в разделе, посвященном износу, автор не только избегает установления сколько-нибудь обобщающих количественных зависимостей, но даже не затрагивает в порядке критического анализа уже имеющихся в этом направлении теоретических попыток (работы Юстрова, Габо и др.); отсутствует конструктивная оценка свободной трубы в сочетании с кожухом и т. д. Книга не лишена ряда опечаток и описок, что несколько усложнило выполнение ее перевода.

Ознакомление с монографией Швиннинга, вводящей в курс современного положения иностранной артиллерийской техники в области вопросов, связанных с конструированием и живучестью стволов огнестрельного оружия, а также с выбором и оценкой качества ствольного материала, должно представить интерес для артиллерийских инженеров РККА и инженерно-технических работников нашей оборонной промышленности.

Книга может быть использована также как пособие при самостоятельной работе слушателей и студентов соответствующей специальности.

Перевод сделан в полном виде, с сохранением обозначений автора, но с принятием терминологии, применяемой в нашей научно-технической литературе.

А. Головин

Ленинград
Сентябрь 1936 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Последним по времени, наиболее исчерпывающим изложением научных основ расчета и проектирования орудийных стволов, являлся труд Г. Кайзера „Конструкция нарезных орудийных стволов", выпущенный в 1900 г. С тех пор конструирование стволов двинулось вперед по новым путям, указанным развитием сталеделательной индустрии, с одной стороны, и прогрессом артиллерийской техники, основанным на боевом опыте, с другой стороны. Возникли новые способы изготовления стволов и новые теоретические основания расчета, опирающиеся на результаты изучения металла. В связи с этим в немецкой литературе образовался заметный пробел, устранению которого должно помочь издание этой книги.

В данном труде, наряду с методами расчета орудийных стволов, подробно рассматриваются также вопросы, относящиеся к выбору и оценке соответствующих сортов стали для изготовления как орудийных стволов, так и стволов стрелкового оружия. Точно так же значительное место отводится вопросу износа тех и других стволов. Опыт войны показал весьма важное значение исследования данного вопроса. В этом отношении, помимо учета работ других авторов, я опираюсь на собственные исследования, проведенные ранее в лаборатории артиллерийского вооружения бывшей Военно-технической академии (в Берлине — Шарлоттенбурге), а отчасти в руководимом мною в послевоенное время Институте металлургии и материаловедения при Высшей технической школе в Дрездене. Хотя учебная и исследовательская деятельность указанного Института протекает вне области артиллерийской техники, тем не менее произведенные там работы по исследованию материалов, применяемых в общем машиностроении, были использованы при разработке настоящего труда для введения новых оснований в дело выбора материала для стволов артиллерийских орудий и стрелкового вооружения. Подобным же образом опыт военного машиностроения нередко создает побудительные мотивы для выбора и применения высококачественных материалов в других отраслях техники.

В. Швиннинг

Дрезден, октябрь 1934 г.

ГЛАВНЕЙШИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A_0 — дульная энергия снаряда
D — калибр
d — диаметр
E — модуль упругости
G — вес
p — давление (обычно давление пороховых газов)
P — усилие
$\mathfrak{p}, \mathfrak{P}$ — давление (или сила), вызванное скреплением (в состоянии покоя при $p = 0$)
S — напряжение
u — отношение диаметров d_a/d_i
v — скорость
$y = \frac{3u^2}{2u^2 + 1}$
ε — относительная деформация
μ — коэфициент трения
ϑ — линейная величина натяжения при изготовлении (*мм*)
θ — относительное значение натяжения при изготовлении
δ — фактическая величина натяжения после скрепления ствола (*мм*)
Δ — относительное значение натяжения после скрепления ствола
σ — нормальное напряжение
σ_E — предел упругости
σ_S — предел текучести
σ_B — временное сопротивление разрыву
σ_W — предел усталости
τ — скалывающее напряжение

Значение индексов

i — внутренний
a — наружный
d — по теории наибольшей деформации (обычно опускается)
g — по теории энергии формоизменения
0 — в состоянии покоя (до выстрела)
p — при давлении p
1, 2, 3 — порядковый номер слоя в скрепленном стволе, считая извнутри
t — в тангенциальном направлении (в случае теории наибольшей деформации опускается)
r — в радиальном направлении
l — в осевом (продольном) направлении

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее целесообразным введением в область вопросов, связанных с проектированием и изготовлением стволов огнестрельного оружия, является исторический обзор развития этой области техники. Наряду с этим представляется необходимым остановиться и на рассмотрении современных конструкций стволов. Этим вопросам посвящено содержание I и II главы настоящей работы.

Правильно спроектированные стволы огнестрельного оружия не должны давать при стрельбе остаточных деформаций, выходящих из узких пределов установленного допуска по размерам. Соблюдение этого условия при существующих величинах давления пороховых газов может быть всегда обеспечено путем соответствующего устройства ствола и выбора необходимого материала с достаточно высоким пределом текучести. Теория позволяет рассчитать нужные для этого размеры ствола и величину натяжения при скреплении. Теоретические основания расчета стволов и сравнение применяемых теорий с фактическими данными, получаемыми при стрельбе, излагаются в главе III.

Однако, несмотря на полное удовлетворение указанного требования, стволы огнестрельного оружия обладают лишь ограниченным сроком службы. Живучесть винтовочных стволов и пулеметных стволов с водяным охлаждением колеблется в зависимости от режима огня от 10000 до 50000 выстрелов. Живучесть орудийных стволов малой и средней мощности, до полевой пушки включительно, по данным различных государств, основанным на опыте мировой войны, составляет от 10000 до 20000 выстрелов. С увеличением калибра, а особенно с повышением мощности, она сильно понижается, и для крупнокалиберных морских пушек максимальной мощности живучесть падает до нескольких сотен и даже до нескольких десятков выстрелов. Столь короткие сроки службы, не находящие никакого обоснования в расчетах конструктора, послужили поводом к производству ряда исследований, из которых в особенности выделяются работы Вьеля, Шарбонье и Чернова[1]. Достижение предель-

[1] *P. Vieille.* Mém. d. poudres et salp. 11 (1901), p. 157; *P. Charbonnier.* Balistique intérieure. Paris, 1908.

См. указатель литературы в труде *C. Cranz.* Lehrbuch der Ballistik, Bd. 2, Springer. Berlin, 1926, S. 427.

ного срока службы ствола определяется не остаточным расширением (раздутием) или разрывом его, а постепенно развивающимся процессом износа нарезной части канала. Результатом износа является падение меткости и начальной скорости, величины которых становятся в итоге столь низкими, что ствол приходится признавать негодным к дальнейшей службе. В главе IV настоящей книги и рассматриваются вопросы износа стволов огнестрельного оружия в результате воздействия нормальных рабочих усилий во время службы, а также выводы, относящиеся к конструкции и условиям обработки стволов и снарядов. При изложении этой главы приняты во внимание собственные исследования автора.

Если наблюдаются значительные остаточные деформации ствола или происходит его разрыв, то причину этого всегда следует искать либо в дефектах материала и изготовления ствола, либо в возникновении при выстреле усилий, превосходящих допускаемые для данной конструкции напряжения. Действие таких чрезмерно высоких усилий и влияние дефектов технологии рассматриваются в главе V, которая дает вместе с тем довольно подробные сведения о материалах, применяемых для изготовления стволов.

I. ОБЗОР РАЗВИТИЯ СТВОЛОВ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

A. Орудийные стволы

Различные конструктивные идеи, сохранившие свое значение и в современной орудийной технике, возникли очень давно. Так, можно указать на конструктивные наброски стволов, встречающиеся в сочинениях Леонардо да Винчи (ок. 1500 г.), Лорини (1579 г.) и друг., а также на осуществленные уже в XIV—XVII столетии стволы, заряжавшиеся с казны, имевшие поршневые и клиновые затворы и обладавшие винтообразной нарезкой для сообщения устойчивости на полете продолговатым снарядам; известно также было применение скрепляющих колец с целью повышения упругого сопротивления ствола. Однако распространение этих конструктивных форм тормозилось, как общим состоянием техники, так и, в частности, трудностями, связанными с точной механической обработкой, и невысоким уровнем развития металлургии.

Поэтому более чем до середины XIX столетия в области орудийной техники господствовала конструкция стволов, заряжаемых с дула, сначала гладкостенных, а позднее нарезных для стрельбы продолговатыми снарядами с готовыми выступами. В Англии заряжание с дула применялось для тяжелых морских пушек вплоть до 1880 г.

Повсеместное распространение способа заряжания с казны стало возможным только тогда, когда удалось добиться безупречного осуществления обтюрации затворов от прорыва пороховых газов посредством медных или стальных обтюрирующих колец (кольца Брэдуэлла). Разрешение этой задачи было полностью завершено в дальнейшем путем устройства пластичной обтюрации системы Банжа или посредством применения патронной гильзы. Началом успешного применения способа заряжания с казны следует считать 1861 г., т. е. год принятия этого способа в прусской полевой артиллерии, которая показала несомненные преимущества орудий, заряжаемых с казны, во время войн 1866 г. и 1870/71 г.

В отношении развития затворов обозначились две линии конструктивного оформления: в то время как Германия пошла по пути применения и усовершенствования клиновых затворов, в других странах наибольшее применение нашли поршневые затворы с весьма разнообразными типами механизмов, осуществляющих движения затвора. Наряду с этим, для малых калибров получили распространение затворы специальных типов, как, например, вращающийся затвор, составной затвор и т. п.

Появление бездымного пороха * (1885 г.) привело к значительному повышению мощности орудий, в связи с чем были выдвинуты более высокие требования к материалу для изготовления стволов. Бездымный порох стали изготовлять из желатинизированной нитроклетчатки, либо в виде чисто пироксилинового пороха, либо в виде нитроглицеринового пороха, состоящего из пироксилина с добавлением от 18 до 57% нитроглицерина. Порох, применяемый в винтовках, получил форму мелких, тонких пластинок, а для пороха, применяемого в орудиях, была принята форма кубиков, колец, лент, полых трубок и т. д.

В старинных системах для изготовления стволов применялся чугун или бронза. Применение бронзы, улучшенной по способу Ухациуса, удерживалось в Австрии вплоть до мировой войны. Хотя изготовление стволов из чугуна отличается дешевизной и простотой, тем не менее хрупкость и малая прочность этого материала исключили возможность его применения для орудий повышенной мощности. Скрепление же казенной части чугунных стволов посредством колец из кованого железа могло только уменьшить опасность для орудийного расчета при разрыве ствола и не более.

На смену чугуна сначала пришло сварочное железо—материал вязкий, но относительно мягкий, нашедший применение даже в старинных орудиях только в отдельных случаях. Начало применения в качестве ствольного материала стали относится, примерно, к 1860 г. И хотя на первых шагах оно ознаменовалось рядом неудач, тем не менее, вскоре же после того, как были преодолены первоначальные трудности, сталь, в силу своих высоких механических свойств, вытеснила все другие материалы. Знаменательной датой следует признать 1890 г., когда для изготовления орудийных стволов высокой мощности впервые была применена никелевая сталь, а также улучшенная хромоникелевая сталь, характеризующаяся особенно благоприятным сочетанием свойств прочности и вязкости.

---

* Автором применяется более точный термин — „малодымный порох“ (rauchschwaches Pulver). [*Прим. ред.*]

Данные таблиц 1 и 2 показывают возрастание мощности и степени использования веса ствола и системы для некоторых, наиболее типичных образцов. Ход развития, иллюстрируемый этими таблицами, отражает также прогресс в области лафетостроения (в частности, введение систем с откатом по оси) и в снарядном деле. При оценке приведенных данных следует учитывать, что для систем на колесных лафетах требование ограничения веса лафета и ствола оказывает влияние и на величину мощности. В особенности это относится к полевым системам, вес и мощность которых определяется требованиями возможно лучшей подвижности в условиях маневренной войны. Но в то же время следует иметь в виду, что в условиях позиционной войны от этих же систем требуется возможно большая досягаемость и могущество, а следовательно и большой вес.

В таблице 2, относящейся к морским орудиям, приводятся также почерпнутые у Штеттбахера данные об известной 21-*см* пушке, обстреливавшей Париж. И хотя эта пушка представляет собой орудие специального типа, все же она может служить характерным примером достижения максимальной мощности для стационарной системы при современном состоянии техники[2].

В послевоенное время тяжелые орудия на колесном лафете и морские пушки калибром свыше 28 *см* не могли получить развития в Германии, так как их изготовление было запрещено Версальским договором. Другие же страны вели в это время усиленную работу, именно в области тяжелой и зенитной артиллерии. Для вооружения морского флота и для береговой обороны были изготовлены орудия прицельного огня калибром до 50 *см*. Мощность железнодорожной и моторизованной дальнобойной артиллерии в иностранных армиях со времени войны сильно увеличилась. Так, например, в США были изготовлены железнодорожные установки 35,6-*см* калибра, весом 135 *т* с досягаемостью в 36 *км* при угле возвышения в 50° (вес снаряда 710 *кг*, $v_0 = 910$ *м/сек*). Эти установки в результате длительных испытаний показали очень высокие качества. Во Франции калибр тяжелых гаубиц, предназначенных для осады крепостей, был увеличен до 52 *см*, причем ствол получил

---

[2] О данных, характеризующих мощность артсистем в довоенное время, см. *W. Schwinning*. „Technik des Kriegswesens", Teubner, Leipzig, 1913, S. 330, 366 u. 371; Z. VDI 58 (1914), S. 1653 u. 1683. *L. Jacob*. Résistance et construction des bouches à feu. Paris 1920.

О сверхдальнобойной пушке см. *A. Stettbacher*, Schiess- und Sprengstoffe, Barth. Leipzig, 1933, S. 219.

О новых артсистемах см. сообщения в специальной периодической печати и в прессе. *Mc Farland*. Textbook of ordnance and gunnery. John Wilky a. Sons, New-York, 1929. — *Alvin* et *André*. Les canons en service. Charles Lavauzelle et C-e, Paris, 1930.

Таблица I. Характеристики мощности полевых пушек и гаубиц

Наименование характеристик	Размерность	Пушки—полевые (П. п.) и зенитные (З. п.)						15-*см* пушки				Тяжелые полевые гаубицы (заряд наибольший)			
		1891	1913	(1930)	1923	1929	1932	1891	1913	1920	(1930)	1893	1913	1920	(1929)
		П. п. С 73/91, Германия	П. п. Эрхардта, Германия	П. п. Франция	П. п. США	П. п. Бофорс обр. 1929 г., Швеция	З. п. Виккерс, Англия	Германия	Крупп, Германия	США	Шнейдер-Крезо, Франция	Германия	Крупп, Германия	США	Виккерс, Англия
Калибр D	*мм*	88	75	75	75	75	75	150	150	155	155	150	150	155	6″ = 152,4
Длина ствола	калиб.	23,9	31	36	—		46	30	30	—	—	10,8	15	—	—
Вес снаряда G_g	*кг*	7,5	6,5	6,125 —7,98	6,8	6,5	6,5	42,3	41	43,1	50	42,3	41	43,1	39
Начальная скорость v_0	*м/сек*	442	525	—	457* 663**	700	805	495	600	640* 853**	900	276	325	564	518
Дульная энергия A_0	*тм*	74,7	91,4	—	72,4* 152,4**	162,3	214,7	527	754	900* 1598**	2064	192,9	294	699	533
Поле обстрела:															
наиб. угол возвыш. ε	°	—	16,5	18	45	45	90	—	30	65	45	—	43	65	50
гориз. обстрел	°	—	7	6	45	60	360	—	—	60	360	—	—	55	60
Наибольш. досягаемость	*км*	6,5	7,1	11,2 (7,9 при $\varepsilon = 18°$)	13,6	14,0	16,0	10,0	12,0	23,8	26,0	6,05	8,9	15,0	12,2
Вес системы в боевом положении G_w	*кг*	1045	980	1140	1451	1500	2700	6030	5070	12350	16400	2190	2250	6400	5770
Коэфициент использования веса $\frac{A_0}{G_w}$	$\frac{тм}{т}$	71,5	93,3	—	105	108,3	79,5	87,4	148,5	129,4	125,9	88,1	130,6	109,2	92,4
Коэфициент могущества $\frac{A_0}{D^3}$	$\frac{кгм}{см^3}$	109,7	216	—	171,6* 361**	385	509	156	223	242* 429**	554	57,2	87,2	187,7	151,8

* Нормальный заряд.
** Наибольший заряд.

Таблица 2. Характеристика морских пушек большой мощности

Наименование характеристик	Размерность	1864 Армстронг, Англия	1887 Крупп, Германия	1913 Крупп, Германия	1910 Виккерс, Англия	1913 Крупп, Германия	1913 Элсвик, Англия	1930 Элсвик, Англия	1918 * Сверхдальноб. пушка, Германия	1930 США
Материал ствола	—	сварочное железо	углеродистая сталь	хромоникелевая сталь	(никелевая сталь)	хромоникелевая сталь	—	—	—	никелевая сталь
Калибр D	*мм*	305	305	305	305	210	203	203	210	406
Длина канала	калибры	15	37	52	51	50	50	50	171	45
Длина ствола	*мм*	4650	12200	16000	15700	11010	—	—	37000	—
Вес ствола G_r	*кг*	23900	54000	47800	66820	15450	20730	17000	—	105000
Вес снаряда G_g	*кг*	278	455	390	385,6	125	113,4	113	120	953
Вес заряда L	*кг*	38,6	175	162	156	52,3	40,8	—	195	—
Род пороха	—	черный порох	черный порох	нитроглицериновый порох	нитроглицериновый порох	нитроглицериновый порох	нитроглицериновый порох	нитроглицериновый порох	нитроглицериновый порох	нитроглицериновый порох
Начальная скорость v_0	*м/сек*	396	610	940	917,4	940	914	914	1700	853
Дульная энергия A_0 . .	*тм*	2230	8630	17560	16540	5630	4830	4810	17680	35340
Коэфициент использования веса ствола $\frac{A_0}{G_r}$	$\frac{тм}{т}$	93	160	366	248	364	233	283	—	337
Коэфициент могущества $\frac{A_0}{D^3}$	$\frac{кгм}{см^3}$	78,7	304	620	584	608	577	575	1909	529

* Данные по Штеттбахеру.

длину 8,35 *м* (= 16 калибрам). Конструкция этой гаубицы разработана фирмой Шнейдер-Крезо в виде железнодорожной установки весом 250 *т* с досягаемостью в 17 *км* при угле возвышения 60° (вес снаряда 1654 *кг* и $v_0 = 500$ *м/сек*). Кроме того, в Англии и Франции осуществлены сверхдальнобойные пушки с досягаемостью 110—120 *км* и начальной скоростью ок. 1400—1500 *м/сек*. Но мощность германской сверхдальнобойной пушки Круппа остается, повидимому, до сих пор еще не превзойденной.

В таблице 2 даны характеристики стволов новейших английских и американских пушек (1930 г.) 40,6-*см* и 20,3-*см* калибра. Мощность современной 20,3-*см* английской пушки фирмы Элсвик против 1914 г. не повысилась.

Б. Стволы стрелкового оружия

Во время применения черного пороха ружейные стволы сначала обладали крупным калибром. Затем балистические преимущества малого поперечного сечения пули привели постепенно к уменьшению калибра. При введении на вооружение пироксилинового пороха высокой мощности (ок. 1885 г.) и принятии пуль, снабженных оболочкой, калибр винтовочных стволов понизился до 6,5—8 *мм*. Первоначально пули имели круглую головную часть. Примерно с 1900 г., сначала во Франции и Германии, а затем и в других странах, была принята остроконечная пуля, показавшая значительное превосходство в балистическом отношении. Пределом для дальнейшего уменьшения калибра явилась способность пули к нанесению достаточно серьезного ранения, а также достаточно высокое использование энергии пороха (понижающееся с уменьшением калибра). Поэтому калибр 6,5 *мм* приходится признать за минимальный.

Уже неоднократно предлагалось соединить преимущество большого калибра в отношении использования энергии пороха с выгодой, даваемой малым калибром в преодолении сопротивления воздуха при стрельбе на большие дистанции, путем устройства канала в виде конуса. При этом пуля при перемещении в канале постепенно деформировалась бы, изменяя диаметр, например, с 9 *мм* до 7 *мм*, и таким образом было бы лучше использовано высокое давление газов на первоначальную, увеличенную площадь поперечного сечения пули. Эта издавна известная идея дала повод к взятию в 1903 г. патента Пуффом на пулю специальной конструкции. Недавно новая конструкция пули была опять предложена Герлихом [3]. Изготовление нарезного ствола с коническим каналом, переходящим в цилиндрический лишь на небольшом

[3] По газетным сведениям.

участке в дульной части, представляет собой технически трудную, особенно при массовом производстве, задачу, но, конечно, отнюдь не неразрешимую. Решающее значение в этом вопросе имеет возможность осуществления в условиях массового производства такого устройства и применения пули, чтобы в любом месте конического канала была обеспечена безупречность обтюрации и вместе с тем условия ведения пули давали бы надежную гарантию в получении хорошей меткости также и на больших дистанциях[4]. В свое время изобретение Пуффа потерпело неудачу, вследствие дефектов в ведении пули. Дает ли конструкция Герлиха путь к разрешению этой задачи, судить об этом по имеющимся газетным данным не представляется возможным.

---

[4] Недостаточная устойчивость пули надежно обнаруживается при определении меткости лишь в случае стрельбы на дистанцию свыше 300 *м*, так как только тогда заметно сказывается влияние возрастания сопротивления воздуха. Стрельба на дистанцию 100 *м* не позволяет еще сделать достаточно определенных выводов.

II. УСТРОИСТВО СОВРЕМЕННЫХ ОРУДИИНЫХ СТВОЛОВ

Образующиеся при сгорании пороха газы достигают максимального давления уже при небольшом перемещении снаряда в канале. На дальнейшем пути снаряда происходит их расширение, связанное с понижением давления. На рис. 1 представлена в качестве примера кривая давления газов для 7,5-*см* скрепленного ствола полевой пушки. Использование пороха достигается тем в большей мере, чем длиннее та часть канала, на которой происходит расширение газов. Поэтому при применении очень больших зарядов, — как это имеет место в морских и зенитных орудиях, — когда требуется достижение максимально возможной дульной энергии при данном калибре, необходимы стволы значительной длины — в 50 калибров и более, позволяющие получить достаточно высокое использование энергии пороха. В случае применения только малых зарядов, как, например, для мортир, требуется и небольшая длина ствола, составляющая всего от 12 до 16 калибров.

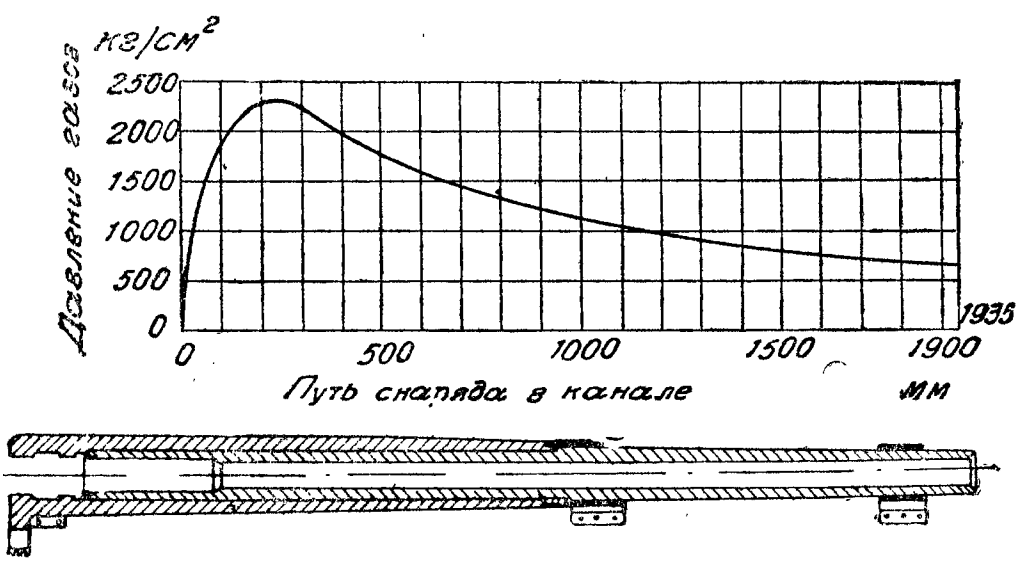


Рис. 1. Кривая давления газов для 7,5-*см* скрепленного ствола полевой пушки

Характер горения пороха, а следовательно величина максимального давления и ход кривой давления газов находятся в сильной зависимости от размеров каморы, плотности заряжания, сопротивления, испытываемого снарядом при врезании в нарезы, и от ускорения снаряда. Большое значение имеет род пороха, — в частности, его химический состав, величина, форма и обработка поверхности отдельных зерен. Поэтому подбор пороха в каждом случае должен производиться в соответствии с устройством ствола и снаряда (см. по этому поводу стр. 97).

Действию максимального давления газов подвергается только пороховая камора и примыкающий к ней участок нарезной части до определенного места. На остальном протяжении канала действует меньшее, постепенно понижающееся к дульному срезу, давление газов. Форма и устройство ствола должны находиться в соответствии с ходом кривой давления газов, если только не требуется большая толщина стенки по другим соображениям (жесткость ствола и т. д.).

Снаряд на полете имеет не только поступательное, но и быстрое вращательное движение вокруг своей продольной оси. Возникающий при этом эффект, аналогичный действию волчка, препятствует опрокидыванию снаряда и, при правильном выборе вращательной скорости, обеспечивает касательное положение оси снаряда по отношению к траектории. Для сообщения снаряду вращения поверхность канала снабжена винтообразной нарезкой, состоящей из нарезов и полей (см. рис. 22—25). Врезаясь в ведущий поясок снаряда, поля нарезки и приводят последний во вращательное движение. В стрелковом оружии поля врезаются непосредственно в оболочку пули.

Стволы стрелкового оружия изготовляются путем рассверливания и обточки заготовок, представляющих собою хорошо прокованные (в сплошном виде) и обычно подвергнутые термической обработке (улучшению) стальные штанги. Орудийные стволы, испытывающие умеренное давление газов, изготовляются также в виде однослойных труб, свободных от предварительных напряжений. Но в таких трубах распределение напряжений в стенке при выстреле является неравномерным в том смысле, что внутренние слои напряжены до предела, а наружные слои весьма мало участвуют в общем сопротивлении. Поэтому орудийные стволы в большинстве случаев изготовляются таким образом, что еще в состоянии покоя (до выстрела) они обладают искусственно созданными напряжениями, которые, слагаясь с напряжениями, вызванными давлением газов при выстреле, обеспечивают более равномерное распределение по толщине стенки ствола результирующих напряжений в момент вы-

стрела. С целью создания указанных предварительных напряжений ствол делается многослойным, т. е. состоящим из ряда слоев, надеваемых один на другой с натяжением в нагретом состоянии. В результате этого приема, называемого скреплением, во внутренних слоях ствола образуются напряжения сжатия, компенсирующие часть напряжений растяжения, возникающих при выстреле.

Стволы средней мощности для систем на колесных лафетах представляют собою конструкцию, состоящую из двух слоев, т. е. из внутренней трубы и кожуха (рис. 1). Кожух перекрывает только часть ствола, отвечающую каморе и наиболее нагруженному участку канала. В дульной части, подвергающейся, как это следует из кривой давления газов, значительно меньшим напряжениям, достаточно ограничиться одним слоем.

Очень высокие давления газов, применяемые в морской артиллерии, приводят к необходимости устройства стволов

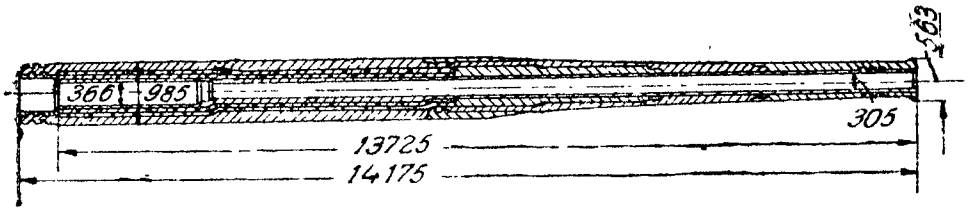


Рис. 2. Ствол французской 30,5-*см* морской пушки, длиной 50 клб., обр. С 06

Вес снаряда $G_g = 440$ *кг*; начальная скорость $v_0 = 875$ *м/сек*; дульная энергия $A_0 = 17170$ *тм*.; вес ствола $G_r = 54650$ *кг*

из трех и четырех слоев. Такое устройство имели первые, изготовленные Круппом, скрепленные стволы. Рис. 2 представляет скрепленный ствол французской 30,5-*см* пушки (по Жакобу).

Затвор в современных стволах всегда помещается в кожухе, имея в виду возможность изготовления наиболее напряженной и длинной внутренней трубы из поковки, имеющей одинаковое сечение по всей длине. Остальные скрепляющие слои, имеющие своим назначением только участие в общем сопротивлении ствола действию давления газов, применяются в виде более или менее длинных цилиндров для того, чтобы уменьшить величины необходимых поковок. Отдельные элементы ствола должны быть хорошо обеспечены от взаимного смещения посредством устройства уступов, навинчиванием, применением штыкового замка и т. д. Подобного рода соединения применены в представленном на рис. 2 стволе современной французской морской пушки.

Для изготовления подобного ствола требуется сталь, обладающая очень высоким пределом текучести, во избе-

жание получения остаточного расширения канала при действии давления газов, и вместе с тем весьма значительной вязкостью, обеспечивающей ствол от разрыва в случае действия давления, значительно превосходящего допускаемое. Технологические операции, заключающиеся в выплавке крупных слитков, их ковке и термической обработке (улучшении) и имеющие целью получение лишенного пороков и однородного орудийного материала, представляют собою трудную металлургическую задачу и требуют большого опыта.

Поэтому в Англии, а также в Америке, нашло применение так называемое проволочное скрепление, заключающееся в том, что на внутреннюю трубу производится навивка с заданным натяжением большого числа слоев плоской ($6{,}4 \times 1{,}5$ *мм*^{2}) стальной проволоки. На скрепленную таким способом трубу надевается затем, также с натяжением, нагретый кожух. На рис. 3 представлен 30,5-*см* ствол, скре-

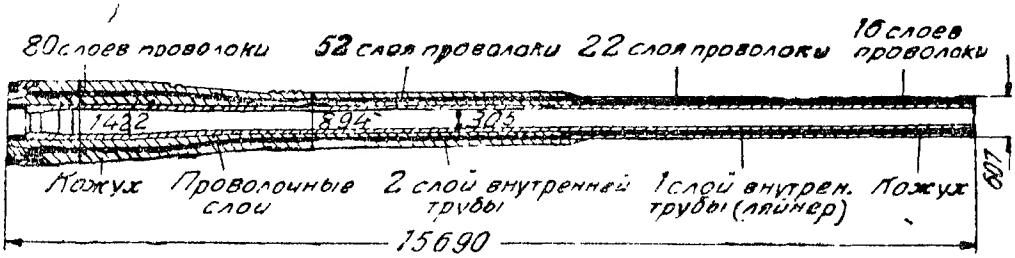


Рис. 3. Скрепленный проволокой ствол 30,5-*см* пушки Виккерса, длиной в 50 клб., обр. 1910 г.

$G_g = 386$ *кг*; $v_0 = 917$ *м/сек*; $A_0 = 16540$ *тм*; $G_r = 66800$ *кг*

пленный проволокой. Изготовление проволоки, обладающей требуемой высокой прочностью, затруднений не встречает. Однако, повышение упругого сопротивления ствола достигается не только за счет высокой прочности проволоки. В гораздо большей мере оно определяется высокими свойствами материала трубы, и такое же упругое сопротивление может быть получено без труда и для ствола, скрепленного цилиндрами, с толщиной стенки, равной калибру. Коэфициент использования веса для стволов, скрепленных проволокой, оказывается также не выше, чем для стволов, скрепленных цилиндрами. При равной толщине стенки продольная жесткость проволочных орудий будет ниже и менее равномерна по длине ствола. Следствием недостаточной жесткости стволов, скрепленных проволокой, является прогиб дульной части, неравномерные колебания ее при стрельбе и, следовательно, увеличение рассеивания. В наличии большого числа поверхностей раздела между слоями в проволочных орудиях автор усматривает также причину понижения теплопроводности стенки ствола, а следовательно и его живучести

(см. стр. 157). В изготовлении стволов, скрепленных проволокой, большой опыт приобретен английскими заводами, имеющими и хорошее оборудование для этой цели. Обоснованных данных для сравнения стоимости изготовления стволов, скрепленных проволокой и цилиндрами, не имеется. Но автор не думает, что общая стоимость ствола может быть существенно снижена за счет уменьшения его веса при применении проволочного скрепления. А в таком случае при современном состоянии металлургической техники для других стран не имеется никаких оснований следовать примеру Англии.

Третий способ скрепления, называемый автофретажем, позволяет осуществить создание предварительных напряжений в стволе, состоящем из одного слоя. Если ствол подвергнуть пластической деформации посредством действия внутреннего давления (гидравлического; давления газов; путем прогонки пуансонов), превосходящего предел упругого сопротивления, то, после снятия указанного давления, в стенке ствола возникнут остаточные напряжения, которые повысят предел упругого сопротивления приблизительно до величины давления автофретажа[5]. В случае значительной деформации ствола, кроме возникновения остаточных напряжений, произойдет повышение предела текучести внутреннего слоя вследствие наклепа. Но в то же время вязкость указанного слоя существенно понизится (см. стр. 74).

Устройство каморы и затворной части ствола зависит от принятого способа обтюрации и типа затвора. Метод пластической обтюрации (рис. 4) применим только при поршневом затворе. Пластические обтюраторы устраиваются английскими и американскими заводами в стволах высокой мощности, но только при картузном заряжании. Применение этого способа обтюрации позволяет придавать каморе любую форму и размеры (см. рис. 3), не увеличивая диаметра затвора и действующего на него усилия.

При клиновом затворе (рис. 5), применяемом, как правило, германскими заводами, обтюрация осуществляется при помощи гильзы. Этот же способ обтюрации издавна во всех странах находит применение и при поршневых затворах в стволах полевых и зенитных пушек, в морской артиллерии малых и средних калибров и т. д., — т. е. в таких орудиях, к которым предъявляются особенно высокие требования в отношении скорострельности. В настоящее время, в связи со стремлением к автоматизации затворов, во многих странах и для орудий указанных типов находят все

[5] См. *W. Schwinning*, Heerestechnik 5 (1917), S. 128; *Mc Farland*, p. 180; *L. Jacob*, p. 153.

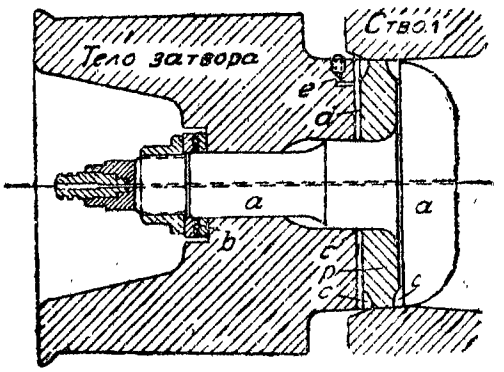


Рис. 4. Пластический обтюратор (по Mc Farland'y)

a грибовидный стержень
b шариковый подпятник
c пришлифованные, пружинящие разрезные стальные кольца
d стальная плитка
e отверстие для смазки
p уплотняющая подушка (асбест и сало, спресованные при высоком давлении)

Стержень *a* может смещаться назад сквозь тело затвора, а также поворачиваться, благодаря наличию шарикового подпятника *b*. При выстреле обтюрирующая подушка *p* раздается и, прижимаясь к стенкам ствола, создает уплотнение. Стержень *a* снабжен продольным отверстием, служащим для воспламенения порохового заряда.

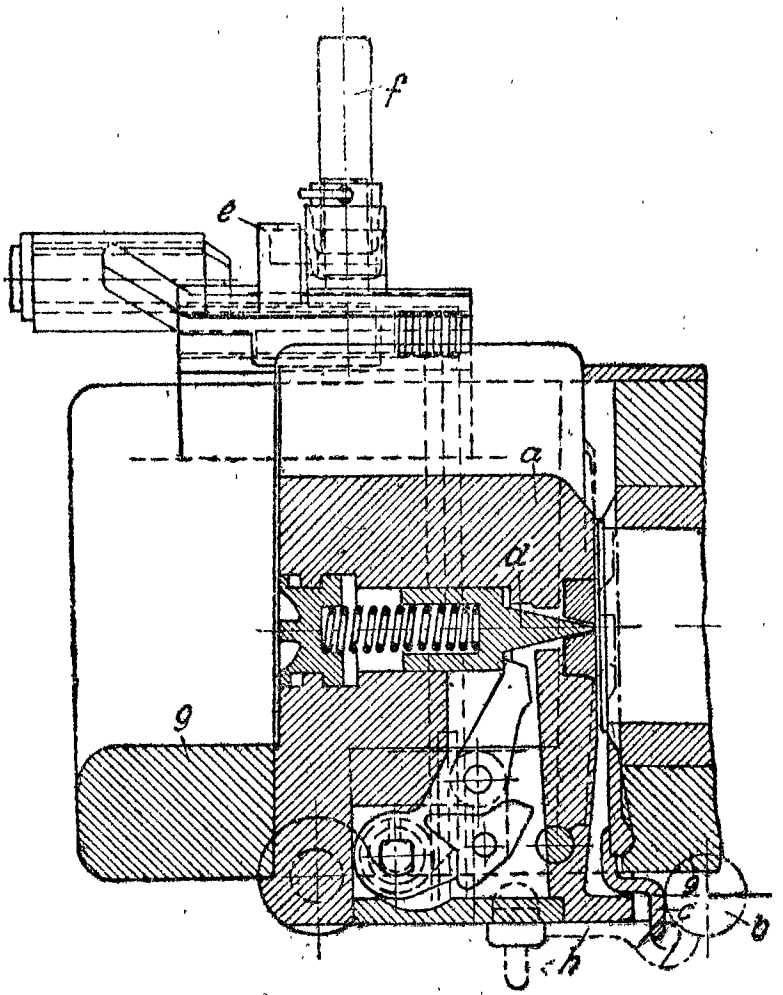


Рис. 5. Горизонтальный клиновой затвор 7,5-*см* полевой пушки длиной 30 калибров

Конструкция фирмы Круппа, Эссен

a тело клина
b кривошип
c выбрасыватель
d боек ударника
e стопор левого спуска
f рукоятка
g тело ствола
h спусковой стержень правого спуска

большее применение клиновые затворы (горизонтальные или вертикальные), как более пригодные для конструктивного разрешения задач автоматики.

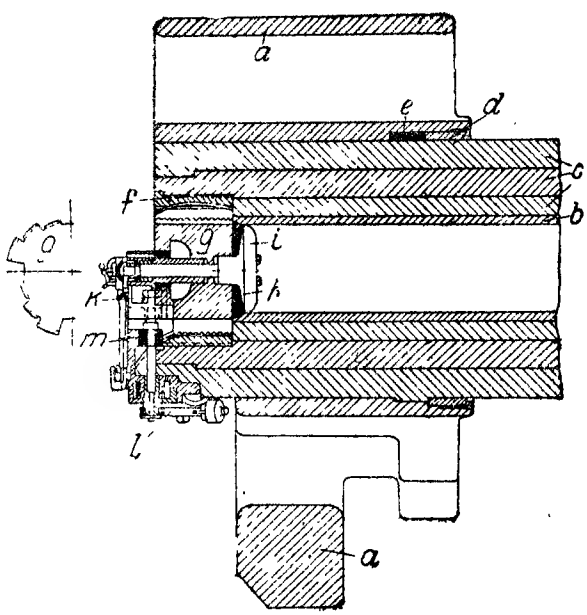
Несмотря на относительную дороговизну изготовления, требующего — в особенности в случае крупных калибров — большого опыта, гильзовый способ обтюрации получил ши-

Рис. 6 и 7. Американский ступенчатый поршневой затвор ствола морской пушки 35,6 клб. (по Mc Farland'y)

Рис. 6. Общий вид

Рис. 7. Разрез

a массивное тело, служащее для связи ствола с противооткатным устройством и одновременно являющееся дополнительным грузом для утяжеления казенной части
b ляйнер, вставленный с натяжением
c скрепленный трехслойный ствол
d кольцо, *e* клин } для связи тела со стволом
f вставленное с натяжением кольцо с нарезкой для затвора
g тело затвора со ступенчатой нарезкой
h подушка
i грибовидный стержень } пластического обтюратора
k крейцкопф для передачи и управления движением затвора
l рычаг, обслуживающий движения затвора
m откидная рамка затвора



Открывание и закрывание затвора облегчается посредством пружины, уравновешивающей вес затвора и пневматически действующего поршня. Пружина и поршень помещены в теле *a*

рокое распространение ввиду тех преимуществ, которые он дает в отношении скорострельности и безопасности орудийного расчета. В орудиях калибром до 10 *см* снаряд, заряд и гильза соединяются, с целью повышения скорострельности, в так называемый унитарный патрон. В орудиях же крупных калибров, учитывая большой вес снаряда и заряда, приходится применять раздельное заряжание.

Применение клинового затвора связано с утолщением и удлинением, а следовательно и с утяжелением затворной части ствола (см. стр. 101). Но поршневой затвор получает заметное преимущество только для таких стволов крупного калибра, для которых, в связи с требованием подвижности, вопрос об уменьшении веса ствола получает исключительно большое значение. В большинстве же случаев более важное

значение имеют соображения, связанные с увеличением поля вертикального обстрела. Поэтому приходится стремиться к переносу центра тяжести ствола назад, — а в этом отношении более тяжелый клиновый затвор имеет несомненное преимущество перед поршневым. В целях возможно большего смещения центра тяжести ствола назад, в американской артиллерии для орудий с большим полем вертикального обстрела применяется утяжеление затворной части посредством особого дополнительного груза, не считаясь с тем, что последний обусловливает увеличение веса ствола. Этот груз приспособлен к стволу таким образом, что он используется в то же время для связи с противооткатным устройством (рис. 6 и 7)[6].

---

[6] См. *Mc Farland*, p. 201.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОРУДИЙНЫХ И ВИНТОВОЧНЫХ СТВОЛОВ

А. Расчет напряжений и усилий в толстостенных цилиндрах

1. Напряжения и деформации

Если толстостенная труба, имеющая внутренний диаметр d_i (*см*) и наружный диаметр d_a (*см*), подвергнута действию давления p_i (*кг/см*^{2}), то в любом слое трубы диаметра d возникают напряжения: σ_t — в тангенциальном направлении и σ_r — в радиальном направлении. Величины этих напряжений вычисляются по формулам [7]:

$$\sigma_{pt} = \frac{1}{u^2 - 1}\left[p_i - u^2 p_a + \left(\frac{d_a}{d}\right)^2 (p_i - p_a)\right] \qquad (1)$$

$$\sigma_{pr} = \frac{1}{u^2 - 1}\left[p_i - u^2 p_a - \left(\frac{d_a}{d}\right)^2 (p_i - p_a)\right], \qquad (2)$$

где $u = \frac{d_a}{d_i}$.

Величина осевого напряжения σ_l находится в зависимости от того, приложены или нет усилия к торцам трубы. Осевое напряжение может быть также вызвано натяжением при скреплении. Но, вообще при определении максимального напряжения, вопрос об осевом напряжении имеет второстепенное значение.

Упругие деформации, вызванные указанными напряжениями, ε_t — в тангенциальном и ε_r — в радиальном направлении определяются из формул:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E}\left(\sigma_t - \frac{\sigma_r + \sigma_l}{m}\right), \quad \varepsilon_r = \frac{1}{E}\left(\sigma_r - \frac{\sigma_t + \sigma_l}{m}\right) \qquad (3)$$

где $\frac{1}{m}$ — коэфициент Пуассона, имеющий для стали численное значение между 1/3 и 1/3,5, а E — модуль упругости.

Если в трубе, находящейся в покое, имеются напряжения σ_{0t}, σ_{0r}, σ_{0l}, вызванные скреплением, холодной пласти-

[7] Вывод формул (1) и (2) см. *C. Bach.* Elastizität und Festigkeit. 8. Aufl. Springer; Berlin 1920, S. 580.

ческой деформацией и т. д., то результирующие напряжения при действии давления p будут равны:

$$\sigma_t = \sigma_{pt} + \sigma_{0t};\ \sigma_r = \sigma_{pr} + \sigma_{0r};\ \sigma_l = \sigma_{pl} + \sigma_{0l}.$$

Следовательно, все напряжения, возникающие по каким-либо причинам в стенке трубы, при определении соответствующих результирующих напряжений должны алгебраически складываться, т. е. каждое из напряжений должно входить в сумму со своим знаком (+ для растягивающих и — для сжимающих напряжений). То же самое относится к упругим деформациям (растяжения +, сжатия —).

Все приведенные выше формулы, установленные и экспериментально проверенные многими исследователями, справедливы только в области упругих деформаций трубы и при постоянном значении модуля упругости E. Следовательно, эти формулы, строго говоря, применимы только до достижения материалом предела упругости и дают лишь приближенные результаты до предела текучести. Как только в наиболее напряженном слое трубы, каковым является всегда внутренний поверхностный слой, предел текучести оказывается превзойденным, рассматриваемые формулы становятся непригодными.

2. Условия, определяющие наступление текучести металла (теории прочности)

Труба, подвергнутая действию внутреннего давления, находится в объемном напряженном состоянии. Поэтому переход за предел упругости материала в наиболее сильно напряженном слое не решается величиной одного из напряжений. В отношении определения условий наступления текучести металла или, иными словами, достижения предела упругого сопротивления объемно напряженного тела предложен ряд теорий[8]. В общем машиностроении, а также в орудийном деле, до сих пор еще наиболее распространенной является теория наибольшей деформации, согласно которой принимается, что достижение предела упругого сопротивления определяется величиной наибольшей деформации ε. Новейшие исследования, среди которых выделяются работы Лодэ[9], Роса и Эйхингера[10] и Клейна[11], показали, что теория наибольшей деформации дает несколько пониженную величину приведенного напряжения (см. ниже)

---

[8] Обзор этих теорий дан в работе *W. Lode.* Der Einfluss der mittleren Hauptspannung auf das Fliessen der Metalle. VDI — Forschungsheft 303. VDI-Verlag, Berlin 1928.

[9] *W. Lode,* см. сноску (8)

[10] *M. Ros* u. *A. Eichinger.* Versuche zur Klärung der Frage der Bruchgefahr, Zürich, 1929.

[11] *H. Klein,* Mitt. Kais. Wilh. Inst. Eisenforschg. 11 (1929) S. 331.

и что, на современном уровне наших знаний, она должна быть заменена теорией энергии формоизменения. Согласно последней теории принимается, что достижение предела упругого сопротивления тела определяется величиной работы, необходимой для его формоизменения. Следует при этом отметить, что все произведенные до настоящего времени исследования проводились путем статических испытаний.

Под приведенным напряжением объемно напряженного тела разумеется фиктивное напряжение S, выражение которого согласно теории наибольшей деформации имеет вид:

$$S = E\varepsilon, \tag{4}$$

где ε есть деформация выбранной части тела в определенном направлении. Согласно теории энергии формоизменения (далее сокращенно обозначается теория э.-ф.) приведенное напряжение выражается следующим образом:

$$S_g = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_t)^2}\ . \tag{5}$$

Если при данном статическом давлении вычисленное указанным способом приведенное напряжение S превзойдет величину предела упругости материала, определенного посредством испытания на растяжение, то на внутренней поверхности трубы появится первая остаточная деформация.

3. Приведенные напряжения

Для определения приведенных напряжений в стенке трубы, свободной от напряжений в состоянии покоя, служат нижеследующие формулы:

а) По теории наибольшей деформации

Наибольшие приведенные напряжения возникают в тангенциальном направлении и максимального значения достигают на внутренней поверхности трубы. Следовательно, решающее значение имеют тангенциальная деформация и соответствующее ей приведенное напряжение. Все последующие формулы выведены из теории наибольшей деформации и относятся к указанным тангенциальным величинам, причем для упрощения индекс t отброшен. Общее выражение для тангенциального приведенного напряжения S имеет вид:

$$S = E\varepsilon_t = \sigma_t - \frac{\sigma_r + \sigma_l}{m}; \tag{6}$$

σ_t и σ_r известны из формул (1) и (2). Если положить, что коэфициент Пуассона $1/m = 1/3$, то тангенциальное приведенное напряжение в слое диаметра d при действии давлений p_i и p_a выразится следующим образом:

$$S = \frac{2}{3(u^2-1)}\left\{\left[1+2\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right]p_i - \left[u^2+2\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right]p_a\right\} - \frac{\sigma_l}{3}. \quad (7)$$

Если труба подвергнута действию одного только внутреннего давления p_i, то будем иметь

$$S = \frac{2}{3(u^2-1)}\left[1+2\frac{d_a^2}{d^2}\right]p_i - \frac{\sigma_l}{3}. \quad (8)$$

Для внутренней поверхности трубы (т. е. для $d = d_i$) отсюда получим:

$$S_i = \frac{2}{3}\frac{1+2u^2}{u^2-1}p_i - \frac{\sigma_l}{3} = \frac{2}{3}\frac{1}{y-1}p_i - \frac{\sigma_l}{3}, \quad (9)$$

а для наружной поверхности (для $d = d_a$)

$$S_a = \frac{2}{u^2-1}p_i - \frac{\sigma_l}{3}. \quad (10)$$

Разность величин приведенных напряжений, отвечающих указанным поверхностям, составляет:

$$S_i - S_a = \frac{4}{3}p_i.$$

Для удобства вычислений, в формуле (9) введено обозначение $y = \frac{3u^2}{2u^2+1}$ [12]. Численные значения y, отвечающие различным отношениям u, приводятся в таблице 3.

Для трубы, подвергнутой действию только наружного давления p_a, будем иметь следующие формулы:

$$S = -\frac{2}{3(u^2-1)}\left[u^2+2\frac{d_a^2}{d^2}\right]p_a - \frac{\sigma_l}{3} \quad (11)$$

$$S_i = -\frac{2u^2}{u^2-1}p_a - \frac{\sigma_l}{3} = -\frac{2}{3}\frac{y}{y-1}p_a - \frac{\sigma_l}{3} \quad (12)$$

$$S_a = -\frac{2}{3}\frac{2+u^2}{u^2-1}p_a - \frac{\sigma_l}{3} = -\frac{2}{3}\left(\frac{1}{y-1}-1\right)p_a - \frac{\sigma_l}{3} \quad (13)$$

$$S_i - S_a = -\frac{4}{3}p_a.$$

Из приведенных формул видно, что внутреннее давление вызывает только растягивающие напряжения, а наружное давление — только сжимающие, причем и те и другие напряжения по абсолютной величине достигают максимального значения на внутренней поверхности трубы, а по направлению к наружной поверхности весьма значительно уменьшаются.

---

[12] См. *G. Kaiser.* Construktion der gezogenen Geschützrohre. W. Seidel u. Sohn. Wien, 1900.

Таблица 3. Численные значения y, отвечающие различным отношениям $u = d_a/d_i$ (по Дирмозеру)

u	y	u	v	u	y
1,00	1,0000	1,49	1,2243	2,46	1,3855
1,01	1,0066	1,50	1,2273	2,48	1,3872
1,02	1,0131	1,52	1,2331	2,50	1,3889
1,03	1,0195	1,54	1,2388	2,52	1,3905
1,04	1,0258	1,56	1,2443	2,54	1,3921
1,05	1,0320	1,58	1,2497	2,56	1,3937
1,06	1,0381	1,60	1,2549	2,58	1,3952
1,07	1,0441	1,62	1,2600	2,60	1,3967
1,08	1,0499	1,64	1,2649	2,62	1,3982
1,09	1,0557	1,66	1,2696	2,64	1,3996
1,10	1,0614	1,68	1,2743	2,66	1,4010
1,11	1,0670	1,70	1,2788	2,68	1,4024
1,12	1,0725	1,72	1,2831	2,70	1,4037
1,13	1,0779	1,74	1,2874	2,72	1,4050
1,14	1,0832	1,76	1,2915	2,74	1,4063
1,15	1,0885	1,78	1,2956	2,76	1,4076
1,16	1,0936	1,80	1,2995	2,78	1,4089
1,17	1,0987	1,82	1,3033	2,80	1,4101
1,18	1,1037	1,84	1,3070	2,82	1,4113
1,19	1,1086	1,86	1,3106	2,84	1,4124
1,20	1,1134	1,88	1,3141	2,86	1,4136
1,21	1,1182	1,90	1,3175	2,88	1,4147
1,22	1,1228	1,92	1,3209	2,90	1,4158
1,23	1,1274	1,94	1,3241	2,92	1,4169
1,24	1,1319	1,96	1,3273	2,94	1,4180
1,25	1,1364	1,98	1,3303	2,96	1,4190
1,26	1,1407	2,00	1,3333	2,98	1,4201
1,27	1,1450	2,02	1,3363	3,00	1,4211
1,28	1,1493	2,04	1,3391	3,05	1,4235
1,29	1,1534	2,06	1,3419	3,10	1,4258
1,30	1,1575	2,08	1,3446	3,15	1,4280
1,31	1,1616	2,10	1,3473	3,20	1,4302
1,32	1,1655	2,12	1,3498	3,25	1,4322
1,33	1,1694	2,14	1,3524	3,30	1,4342
1,34	1,1733	2,16	1,3548	3,35	1,4360
1,35	1,1771	2,18	1,3572	3,40	1,4378
1,36	1,1808	2,20	1,3596	3,45	1,4395
1,37	1,1845	2,22	1,3618	3,50	1,4412
1,38	1,1881	2,24	1,3641	3,55	1,4428
1,39	1,1916	2,26	1,3663	3,60	1,4443
1,40	1,1951	2,28	1,3684	3,65	1,4457
1,41	1,1986	2,30	1,3705	3,70	1,4472
1,42	1,2020	2,32	1,3725	3,75	1,4485
1,43	1,2053	2,34	1,3745	3,80	1,4498
1,44	1,2086	2,36	1,3764	3,85	1,4511
1,45	1,2118	2,38	1,3783	3,90	1,4523
1,46	1,2150	2,40	1,3802	3,95	1,4534
1,47	1,2181	2,42	1,3820	4,00	1,4545
1,48	1,2212	2,44	1,3838		

б) По теории энергии формоизменения

Общая формула получается из выражения (5) путем подстановки в него значений σ_t и σ_r из (1) и (2) в виде:

$$S_g^2 = 3\left(\frac{d_a}{d}\right)^4 \frac{(p_i - p_a)^2}{(u^2-1)^2} + \left[\frac{p_i - u^2 p_a}{u^2-1} - \sigma_l\right]^2. \qquad (14)$$

Формулы, отвечающие случаям одного только внутреннего или наружного давления, получаются из выражения (14) непосредственно после подстановки $p_a = 0$ или $p_i = 0$.

Для обеспечения возможности сравнения теории э.-ф. с теорией наибольшей деформации необходимо принять какое-либо определенное допущение относительно величины σ_l.

Полагая, например, σ_l пренебрежимо малым, т. е. принимая, что $\sigma_l = 0$, как это делается вообще при расчете однослойной трубы (моноблока), будем иметь:

$$S_g = \pm \frac{1}{u^2-1}\sqrt{3\frac{d_a^4}{d^4}\left(p_i - p_a\right)^2 + \left(p_i - u^2 p_a\right)^2}. \qquad (15)$$

Отсюда, в случае действия одного только внутреннего давления ($p_a = 0$) получим:

$$S_g = \frac{1}{u^2-1}\sqrt{3\left(\frac{d_a^4}{d^4}+1\right)}\cdot p_i. \qquad (16)$$

Максимального значения S_g достигает на внутренней поверхности трубы при $d = d_i$:

$$S_{ig} = \frac{\sqrt{3u^4+1}}{u^2-1} p_i, \qquad (17)$$

а минимальное значение S_g отвечает наружной поверхности

$$S_{ag} = \frac{2}{u^2-1} p_i. \qquad (18)$$

В случае действия одного наружного давления будем иметь:

$$S_g = -\frac{1}{u^2-1}\sqrt{3\frac{d_a^4}{d^4} + u^4}\cdot p_a, \qquad (19)$$

на внутренней поверхности

$$S_{ig} = -\frac{2u^2}{u^2-1} p_a, \qquad (20)$$

на наружной поверхности

$$S_{ag} = -\frac{\sqrt{3+u^4}}{u^2-1} p_a. \qquad (21)$$

На рис. 8 и 9 представлены, с целью наглядного сравнения, эпюры приведенных напряжений S_d и S_g, рассчитанных по теориям наибольшей деформации и энергии формоизменения для трубы с толщиной стенки в один калибр, а также эпюры действительных напряжений σ_{pt} и σ_{pr}, вычисленных по формулам (1) и (2).

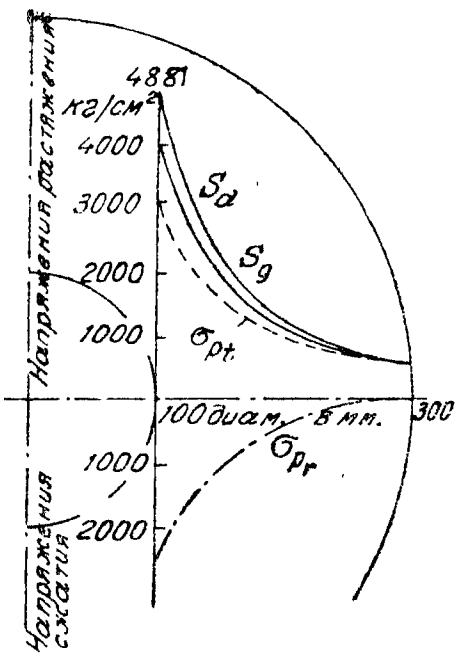


Рис. 8. Эпюры действительных и приведенных напряжений в стенке трубы, подвергнутой действию внутреннего давления в 2500 *кг/см²*

Обозначения на рис. 8 и 9

σ_{pr} радиальное напряжение
σ_{pt} тангенциальное напряжение
S_d приведенное напряжение по теории наибольшей деформации
S_g приведенное напряжение по теории э.-ф.

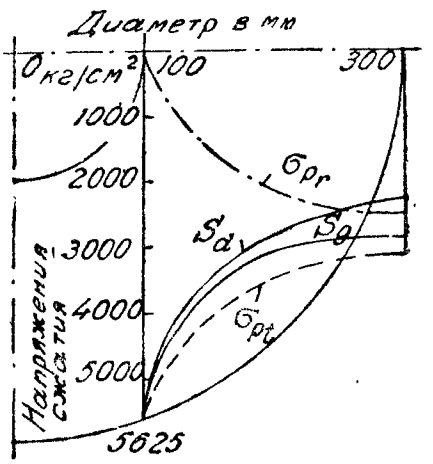


Рис. 9. Эпюры действительных и приведенных напряжений в стенке трубы, подвергнутой действию наружного давления 2500 *кг/см²*

Сравнивая рассматриваемые приведенные напряжения, получаем следующее соотношения:

	на внутр. поверхн.	на наруж. поверхн.
для случая внутреннего давления	$\frac{S_{ig}}{S_{id}}=\frac{3}{2}\frac{\sqrt{3u^4+1}}{2u^2+1}$	$S_{ag}=S_{ad}$
для случая наружного давления	$S_{ig}=S_{id}$	$\frac{S_{ag}}{S_{ad}}=\frac{3}{2}\frac{\sqrt{3+u^4}}{u^2+2}$

Таблица 4 дает численные соотношения максимальных значений приведенных напряжений для труб с толщинами стенок, находящимися в границах, практически применяемых при изготовлении орудийных стволов.

Таким образом максимальные значения приведенных напряжений, отвечающие внутренней поверхности трубы, при $\sigma_l=0$, в случае действия одного наружного давления оказываются одинаковыми при расчете по обеим теориям

Таблица 4. Отношения максимальных значений приведенных напряжений, рассчитанных по теориям наибольшей деформации и энергии формоизменения

Толщина стенки трубы в калибрах				$0{,}1d_i$	$0{,}25d_i$	$0{,}5d_i$	$0{,}75d_i$	$1{,}0d_i$	$1{,}5d_i$
Отношение диаметров $u = d_a/d_i$				1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
Действует только внутреннее давление	Внутренняя поверхность трубы	По теор. наиб. деф.	$\frac{S_{id}}{p_i}$	5,88	2,93	2,00	1,71	1,58	1,47
		По теории э.-ф.	$\frac{S_{ig}}{p_i}$	6,11	3,22	2,33	2,07	1,95	1,85
			$\frac{S_{ig}}{S_{id}}$	**1,04**	**1,10**	**1,165**	**1,21**	**1,23**	**1,26**
	Наружная поверхность трубы		$\frac{S_{ag}}{S_{ad}}$	1	1	1	1	1	1
Действует только наружное давление	Внутренняя поверхность трубы	По теор. наиб. деф.	$\frac{S_{id}}{p_a}$	—6,55	—3,60	—2,67	—2,38	—2,25	—2,13
		По теории э.-ф.	$\frac{S_{ig}}{p_a}$	—6,55	—3,60	—2,67	—2,38	—2,25	—2,13
			$\frac{S_{ig}}{S_{id}}$	1	1	1	1	1	1
	Наружная поверхность трубы		$\frac{S_{ag}}{S_{ad}}$	0,98	1,00	1,085	1,19	1,25	1,34

прочности. В случае же действия одного внутреннего давления, теория э.-ф. дает большее значение рассматриваемого напряжения, чем теория наибольшей деформации, и эта разница с увеличением толщины стенки все более возрастает.

в) Сравнение теорий на основании опытных данных, полученных при статическом давлении

Остаточное расширение ствола происходит в том случае, если максимальное значение приведенного напряжения превосходит предел упругости (или предел текучести) материала. Величины давления, соответствующего началу пластической деформации, находятся в соотношении, обратном численным значениям, приведенным в таблице 4. Таким образом, если толщина стенки трубы составляет, например, $^3/_4$ калибра, что практически соответствует случаю ствола обычной полевой пушки, то давление, отвечающее пределу упругого сопротивления трубы, при расчете по теории наибольшей деформации будет на 20% (в круглых числах) выше, чем при расчете по теории э.-ф.

Опыты Клейна[13] с трубами, подвергавшимися гидравлическому внутреннему давлению, показали, что средняя фактическая величина давления, вызывавшего первое остаточное расширение канала, соответствовала численному значению, определенному путем расчета по теории э.-ф.

В отношении наружного давления соответственных опытных данных еще не имеется. Но все же, опыты Лодэ, а также Роса и Эйхингера[13], относящиеся к другим случаям объемного напряженного состояния, позволяют считать, что в наибольшем соответствии, в пределах ошибок наблюдения, с результатами статического нагружения находится именно теория э.-ф.

Следовательно, в случае статического приложения внутреннего давления, как это имеет место, например, при автофретаже, расчет максимального приведенного напряжения, определяющего начало пластической деформации на внутренней поверхности трубы, следует производить согласно теории э.-ф. Это относится также и к приведенным напряжениям, обусловленным наружным давлением скрепления, которые возникают во внутренних слоях ствола, скрепленного цилиндрами. Но в этом случае, как было показано выше, расчет максимального напряжения на внутренней поверхности как по теории э.-ф., так и по теории наибольшей деформации, приводит к одинаковым результатам.

---

[13] См. сноски 11, 8 и 10.

Итак, статически нагруженные трубы следует рассчитывать согласно теории э.-ф., полагая в основу расчета предел упругости (или предел текучести), определенный посредством обычного испытания на растяжение. Но, в случае быстрого развития напряжений в стенке трубы при выстреле, предел упругого сопротивления трубы (т. е. давление, вызывающее первое, надежно определяемое на практике, остаточное расширение канала) оказывается значительно выше величины, вычисленной указанным способом, превосходя даже значение, отвечающее теории наибольшей деформации.

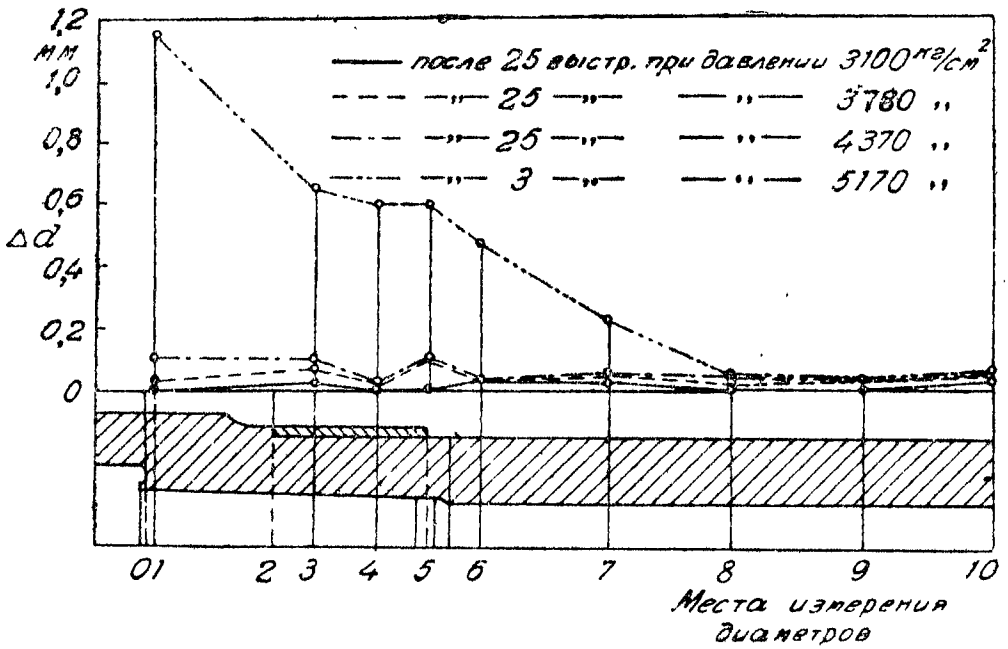


Рис. 10. Увеличение диаметров канала Δd ствола-моноблока 77-*мм* полевой пушки при возрастании давления газов

Б. Состояние орудийного ствола при действии быстро возрастающих усилий (в момент выстрела)

Рассмотренные выше уравнения и опыты имели в виду действие постепенно возрастающего, статического давления. Между тем при выстреле возрастание давления происходит в весьма короткий промежуток времени и период действия максимального давления чрезвычайно мал. Промежуток времени от начала горения до момента достижения наибольшего давления составляет: для винтовки (обр. 98 г.) $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ сек., для полевой пушки средней мощности ок. $2{,}7 \cdot 10^{-3}$ сек., а для 30,5-*см* морской пушки $L/50$ около $19 \cdot 10^{-3}$ сек. Этот промежуток относится в полной мере только к каморе на протяжении ее до начала нарезной

части (положение ведущего пояска). Для соответствующего участка нарезной части канала он является еще менее значительным. Так, например, в сечении, отвечающем наибольшему давлению газов, последнее прилагается мгновенно (от 0 до p_{max}) в момент достижения ведущим пояском этого сечения. Затем, по мере дальнейшего перемещения снаряда,

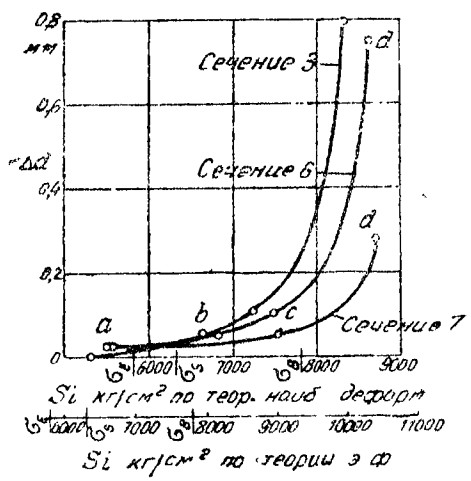


Рис. 11. Приведенные напряжения S_i на внутренней поверхности ствола — моноблока (рис. 10), вычисленные по теориям наибольшей деформации и э.-ф. для наибольших величин давления газов

a после 25 выстр. при $p_i = 3125$ *кг/см²*
b после 25 выстр. при $p_i = 3840$ *кг/см²*
c после 25 выстр. при $p_i = 4250$ *кг/см²*
d после 3 выстр. при $p_i = 5000$ *кг/см²*

Сечение 3 — камора
Сечение 6 — начало нарезной части
Сечение 7 — место наибольшего давления газов

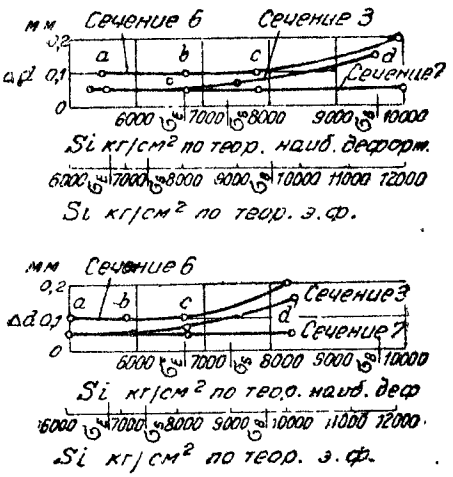


Рис. 12 и 13. Увеличение диаметра Δd и приведенные напряжения S_i на внутренней поверхности скрепленного кожухом ствола 77-*мм* калибра, вычисленные по теориям наибольшей деформации и э.-ф.

Рис. 12. Расчет ствола как однослойной трубы
Рис. 13. Расчет ствола как двухслойной скрепленной конструкции

a после 25 выстр. при $p_i = 3100$ *кг/см²*
b после 25 выстр. при $p_i = 3800$ *кг/см²*
c после 25 выстр. при $p_i = 4400$ *кг/см²*
d после 1 выстр. при $p_i = 5610$ *кг/см²*

в соответствии с ходом кривой давлений, показанной на рис. 1, происходит падение давления пороховых газов. Для полного упругого расширения трубы, которое должно получиться согласно теории, достаточно весьма малого промежутка времени действия давления. Если же давление превышает свое нормальное значение настолько, что труба получает остаточную деформацию, то влияние кратковременности („динамичности". *Ред.*) действия давления газов проявляется в том, что фактическая величина остаточной деформации оказывается значительно меньше, чем при равном давлении, действующем статически.

Подобные быстро возрастающие усилия приводят: а) к повышению предела упругости материала по сравнению со

значением, определяемым путем статического испытания на растяжение, и б) к неполному развитию остаточной деформации, образующейся при переходе за предел упругости. В действительности, первые надежно измеряемые остаточные расширения трубы при выстреле обнаруживаются после заметно более высокого давления газов, чем это можно было ожидать согласно теории, основанной на статическом действии давления. Артиллерийской испытательной комиссией в 1907 г. были поставлены опыты по отстрелу при повышенных давлениях стволов-моноблоков полевой пушки из термически обработанной хромо-никелевой и никеле-вольфрамовой стали. Величины давления газов, измерявшиеся обычным способом медными крешерными цилиндриками, значительно превосходили данные расчета. На рис. 10 в качестве примера показаны кривые остаточных расширений канала одного из стволов, построенные на основании обмеров в ряде сечений.

На рис. 11 остаточные деформации, измеренные в сечениях 3,5 и 6 этого ствола, отнесены к напряжениям, вычисленным по теории наибольшей деформации и по теории энергии формоизменения, причем показаны также значения σ_E, σ_S и σ_B, полученные при испытании материала ствола на растяжение. Рис. 12 и 13 дают аналогичную картину для двуслойного ствола. В качестве предела упругости σ_E взято значение $\sigma_{0,03}$ [14].

---

[14] Определение предела упругости производится различным образом. Строго говоря, предел упругости есть то напряжение, при котором появляется первая остаточная деформация в процессе испытания на растяжение. Учитывая возможную точность измерения, необходимо задаться допуском величины измеряемого остаточного удлинения в качестве условного начала пластической деформации. Эта величина в технических условиях устанавливается как 0,001%, 0,01%, 0,03% или 0,05% от расчетной длины. Ясно, что фиксация тех или иных значений предела упругости производится для одинаковых материалов. Поэтому при сообщении данных испытаний необходимо не просто указывать „предел упругости", а всегда применять обозначения $\sigma_{0,001}$, $\sigma_{0,01}$, $\sigma_{0,03}$ или $\sigma_{0,05}$. Определение $\sigma_{0,001}$ является ненадежным, так как на результат измерения сильно влияют остаточные (unvermeidliche) напряжения материала и друг. обстоятельства. В работах руководимого автором Института, как общее правило, даются пределы $\sigma_{0,01}$, а также $\sigma_{0,05}$. В германских технических условиях на прием орудийного материала, относящихся к военному времени, в качестве предела упругости было установлено значение $\sigma_{0,03}$. Французское морское ведомство в качестве предела упругости принимает величину $\sigma_{0,1}$. Но это значение, вообще говоря, уже совпадает с пределом текучести. За предел текучести, в случае отсутствия ясно выраженной площадки текучести. принимается вообще значение $\sigma_{0,2}$.

Сопротивление разрыву согласно DIN обозначается $\sigma_B = \frac{P_{max}}{f}$, где P_{max} максимальная нагрузка, а f — первоначальная площадь поперечного

Из приведенных опытных данных можно вычислить значения отношения давления газов, вызывающего надежно измеряемое расширение канала от 0,1% до 0,15% калибра (0,08—0,12 *мм*), к величине давления газов, отвечающей, согласно теоретическому расчету, достижению предела текучести на поверхности канала ствола[15]. Эти значения в виде округленных средних чисел для трех стволов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Величины отношения $\frac{p \text{ измеренное}}{p \text{ вычисленное для } \sigma_S}$

		Сечение ствола	
		3 По каморе (с учетом захватов)	5 Начало нарезной части
Для остаточного расширения канала в 0,1 *мм*=0,13% от калибра 77 *мм*			
Расчет по теории . .	наиб. удлинения	1,10	1,20
	э.-ф.	1,30	1,45
Для остаточного расширения канала в 0,3 *мм*=0,39% от калибра 77 *мм*			
Отдельные испытания: Ствол 2	теория наиб. удлин. . .	1,30	1,35
	„ э.-ф.	1,56	1,62
Ствол 3	теория наиб. удлин. . .	1,25	1,32
	„ э.-ф.	1,50	1,59
Ствол 4	теория наиб. удлин. . .	1,25	1,32
	„ э.-ф.	1,50	1,59
Средние значения при расчете по теории	наиб. удлин.	1,27	1,33
	э.-ф.	1,52	1,60

сечения образца. При этом необходимо иметь в виду, что σ_B является не действительным, а условным напряжением. Соответствующее действительное напряжение в момент приложения максимальной нагрузки имеет большую величину, так как площадь поперечного сечения образца в этот момент всегда меньше первоначальной. Поэтому, в работах автора условное напряжение, отвечающее максимальной нагрузке, обозначается через K_z, соответствующее действительное напряжение через σ_z, а наибольшее действительное сопротивление разрыву в шейке (в момент разрыва) — через σ_R (Reissspannung). В случае материала, обладающего значительным поперечным сужением, σ_R может быть много больше, чем σ_B.

[15] Подробности см. *W. Schwinning* Z. ges. Schiess-und Sprengstoffwes. 29 (1934), № 1 и 2.

Первые надежно измеримые остаточные деформации появляются только тогда, когда необходимое для этого внутреннее давление превосходит на 10—20% расчетное значение, отвечающее достижению предела текучести по теории наибольшего удлинения, и на 30—40% — по теории энергии формоизменения.

Деформации же порядка 0,3 *мм* = около 0,4% калибра наблюдаются лишь в том случае, если рассматриваемое превышение давления составляет 25—35% при расчете по теории наибольшей деформации и 50—60%—при расчете по энергии формоизменения. Полученные результаты являются еще более поразительными, если принять во внимание, что действительное давление газов превосходит положенное в основу расчета давление, измеренное по сжатию медных крешерных цилиндриков. Согласно имеющихся к настоящему времени опытных данных величина превышения действительного давления для орудийных стволов составляет обычно от 10 до 20%. Эта величина зависит от характера кривой давлений (и от других факторов) и не исследована полностью для всех случаев.

В основе действительного состояния ствола при выстреле лежит, во-первых, то обстоятельство, что, в силу высокой скорости деформирования, предел упругости материала значительно повышается против значения, определенного путем статического растяжения, и, кроме того, сопротивление развитию пластической деформации также возрастает. Вторым основным моментом является то, что столь кратковременно действующее усилие не успевает завершить в полной мере пластическую деформацию, возникающую после перехода за динамический предел упругости, т. к. время действия этого усилия является незначительным. Эти оба влияния зависят от материала и до настоящего времени еще достаточно не изучены.

Кроме сказанного, необходимо иметь в виду, что непосредственно сразу после перехода за предел упругости стенка трубы пластически деформируется не по всей толщине, а только в тонком слое на поверхности канала. Эта пластическая деформация внутреннего слоя не приводит к соответственно равному остаточному расширению канала. Результатом указанной деформации внутреннего слоя большей или меньшей толщины вследствие развития давления, превосходящего предел упругого сопротивления ствола, является возникновение после выстрела остаточных напряжений в стенке аналогично тому, как это имеет место при искусственном скреплении или при автофретаже [16]. При этом внутренний слой ствола оказывается в упруго сжатом со-

[16] См. *W. Schwinning*. Heerestechn. 5 (1927) S. 121.

стоянии, а остаточное расширение канала будет представлять собою разность между полученной пластической деформацией и упругой деформацией сжатия, обусловленной действием указанных остаточных напряжений. Если взять, например, ствол, имеющий стенку толщиной в $^2/_3$ калибра, то, при пластически деформированной внутренней зоне в $^1/_5$ толщины стенки, остаточная деформация, соответствующая внутреннему диаметру, должна быть равна $0{,}2\%$. Однако, в силу указанной причины, остаточное расширение канала составит не $0{,}2\%$, а всего только $0{,}03\%$. Поэтому получение остаточного расширения канала в $0{,}1\%$ можно ожидать лишь в результате значительно более высокой степени пластической деформации металла стенки ствола. Напряжения, вызванные чрезмерно высоким давлением газов при выстреле, действуют в том же направлении, что и напряжения, произведенные искусственным скреплением. Поэтому возрастание расширения канала не развивается непрерывно в течение всего процесса стрельбы при упомянутом давлении, а достигает определенного предела после некоторого числа выстрелов. При этом предел упругого сопротивления ствола повышается до значения, соответствующего повышенному давлению, вызвавшему остаточное расширение канала.

Из приведенных соображений следует, что расчет ствола моноблока, свободного от предварительных напряжений, можно производить без колебаний с некоторым переходом за предел текучести при наибольшем конструкционном давлении газов (которое назначается выше рабочего давления на требуемый запас прочности), а в основу расчета полагать давление газов, определяемое крешерным способом. Возможность такого подхода подтверждается также наблюдениями, относящимися к полевой пушке высокой мощности. Величина превышения напряжения на внутренней поверхности трубы против предела текучести должна допускаться тем меньше, чем длительнее время действия наибольшего давления газов.

В скрепленных орудийных стволах, состоящих из двух и более слоев, появление остаточного расширения канала происходит, очевидно, при более значительном давлении, чем в стволах-моноблоках, имеющих одинаковую толщину стенки. Производя расчет скрепленных стволов на основании теоретических формул, приведенных на стр. 45—53, допускаемые нагрузки следует выбирать несколько более низкими, чем для стволов-моноблоков, потому что первые следы остаточного расширения канала в скрепленных стволах наблюдаются уже при менее значительном переходе за предел упругости металла. Это подтверждается приведенными на рис. 12 измерениями, отно-

сящимися к двухслойному стволу. В скрепленном стволе первая остаточная деформация влечет за собой появление пластической деформации во внутренних слоях всех скрепляющих элементов. То же самое имеет место и для автофретированного ствола. К этому нужно добавить, что в скрепленном стволе наибольшие напряжения в отдельных слоях зависят от величины натяжения. Если последняя отклоняется от значения, отвечающего одновременному достижению предела упругости металла во всех слоях, то следует ожидать преждевременного появления остаточной деформации: в случае пониженной величины натяжения — на поверхности канала трубы, в случае же повышенной величины натяжения — на внутренней поверхности кожуха. Эти небольшие деформации при дальнейшем повышении давления газов возрастают очень медленно. В соответствии с этим из рис. 12 видно, что первые остаточные деформации становятся доступными для измерения, как только достигается предел текучести при расчете ствола, как двухслойного цилиндра, по теории наибольшей деформации.

Поэтому до настоящего времени расчет орудийных стволов обычно производится по теории наибольшей деформации, причем в качестве конструкционного давления газов принимается значение, основанное на давлении, измеренном крешерным способом, а максимальное приведенное напряжение приравнивается статическим способом определенной величине предела упругости или предела текучести.

Весьма вероятно, что и для случая быстро нарастающих усилий наиболее пригодной является также теория э.-ф., при условии принятия в основу расчета динамического предела упругости в качестве максимального значения приведенного напряжения. Но опытных данных, подтверждающих эту точку зрения, пока не имеется. Имеющиеся результаты опытных стрельб показывают, что повышенное значение динамического предела упругости и несоответствие между фактическим появлением пластической деформации при выстреле и расчетными предположениями, основанными на статической величине приведенного напряжения, определенного согласно теории э.-ф. (дающей большее максимальное значение, чем теория наибольшей деформации на 20—25%), практически выравниваются за счет применения крешерного способа измерения давлений. На это указывают соображения, изложенные ниже.

Приняв за основу давление, измеренное крешерным способом, практически допустимо при расчете по теории наибольшей деформации приравнять допускаемое приведенное напряжение для максимального конструкционного давления газов пределу текучести или даже величине, большей,

примерно, на 10%. В случае же многослойного скрепленного ствола в качестве допускаемого приведенного напряжения для обыкновенной орудийной стали можно принять, при сохранении тех же условий, только статический предел упругости (т. е. $\sigma_{0,01}$ или $\sigma_{0,03}$) или $0{,}9\sigma_S$ в том случае, если известен только предел текучести материала σ_S.

Если же расчет ствола производится по теории э.-ф. и в основу расчета попрежнему берется давление, определяемое крешерным способом, то величина допускаемого напряжения должна быть на 20% выше динамического предела текучести.

В качестве предела упругости и предела текучести данного материала всегда принимаются наименьшие, полученные при испытаниях, значения, но отнюдь не средние.

Учитывая рассеивание фактических величин давления газов, неизбежные на практике погрешности в величине натяжения при скреплении и т. д., конструкционное давление газов берется с некоторым запасом прочности по отношению к среднему рабочему давлению газов. В зависимости от обстоятельств этот запас составляет от 35 до 50%.

Об отношении динамического предела упругости (и текучести) к статическому до настоящего времени не имеется достаточных опытных данных. Динамические испытания на кручение[17] позволяют заключить, что при кручении динамический нижний предел текучести оказывается выше статического примерно на 30%. Верхний предел текучести не принимаемый, правда, в основу расчета, показывает еще большее повышение, превосходящее, в зависимости от формы образца, даже 100%. Кривые зависимости между силой и прогибом, относящиеся к ударным испытаниям на изгиб надрезанных образцов[18], дают также повышение сопротивления деформации на ~ 20%. При большей скорости деформации при выстреле это отношение должно еще более повыситься. Предприняты дальнейшие опыты по определению динамического предела текучести при ударных испытаниях на разрыв с применением пьезоэлектрического способа измерения давлений.

Если известен динамический предел упругости, и конструкционное давление газов устанавливается на основании действительного давления газов, определенного не крешерным, а более совершенным способом, то расчет орудийного ствола следует производить согласно теории энергии формоизменения.

---

[17] Опыты были произведены автором совместно с д-р-инж. *Штилле* в Дрезденском институте металлургии и материаловедения.

[18] *W Schwinning* u. *K. Matthaes.* Die Bedeutung der Kerb schlagprobe. Dtsch. Verband f. d. Materialprüfungen d. Technik. № 78; Berlin.

В. Расчет орудийных стволов по теории наибольшей деформации

1. Однослойный ствол (моноблок)

При расчете ствола по теории наибольшей деформации влияние осевого напряжения σ_l на величину тангенциального приведенного напряжения во внимание не принимается. Это влияние невелико и при разработке проекта им можно пренебречь. После же разработки конструкции ствола производится проверка на влияние осевого напряжения (см. стр. 52). Тогда для однослойного ствола (моноблока) может быть применена следующая формула

$$p = \frac{3}{2}\,\frac{u^2-1}{1+2u^2}\,\sigma \qquad (22)$$

или

$$p = \frac{3}{2}(y-1)\,\sigma,$$

откуда

$$y = \frac{2}{3}\,\frac{p}{\sigma} + 1,$$

где p — максимальное конструкционное давление газов, а σ — допускаемое приведенное напряжение для данного материала (см. стр. 42). Зная y можно по таблице 3 определить u, т. е. отношение наружного диаметра к внутреннему.

В качестве внутреннего диаметра орудийного ствола всегда принимается диаметр по днам нарезов, так как такие узкие выступы, как поля, заметного влияния на поперечное сопротивление ствола не имеют.

2. Ствол, обладающий напряжениями в состоянии покоя (до выстрела)

Если в трубе с внутренним диаметром d_i и наружным диаметром d_a созданы либо путем обычного скрепления цилиндрами, либо посредством автофретажа, предварительные напряжения σ_0, вызывающие в состоянии покоя (до выстрела) деформации ε_0, и если затем труба подвергнута действию внутреннего давления p, вызывающего в свободной от напряжений трубе тех же размеров напряжения σ_p и деформации ε_p, то результирующие напряжения и деформации в этой трубе будут

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_0;\quad \varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_0,$$

а результирующее приведенное напряжение по теории наибольшей деформации

$$S = S_p + S_0.$$

Эти уравнения справедливы как для многослойного скрепленного ствола, так и для автофретированного.

Следовательно, в целях наиболее полного использования сопротивления материала, величины натяжений в многослойных скрепленных стволах должны выбираться таким образом, чтобы при максимальном конструкционном давлении газов результирующее приведенное напряжение на внутренней поверхности каждого слоя равнялось допускаемому напряжению материала этого слоя.

Поэтому во внутреннем слое (трубе) многослойного ствола в результате скрепления должны быть созданы приведенные напряжения сжатия S_0; при этом в наружных слоях возникнут, как следствие, напряжения растяжения (рис. 14). Предельное возможное значение для S_p достигается в том случае, если на внутренней поверхности ствола S_0 будет равно максимальному допускаемому напряжению материала на сжатие, а S—максимальному допускаемому напряжению на растяжение. Полагая эти допускаемые напряжения для стали равными при расчете по теории наибольшей деформации статическому пределу упругости $\sigma_{0,01}$ (или $\sigma_{0,03}$), будем иметь $S = \frac{S_p}{2}$. Таким образом, максимально возможное сопротивление ствола, обладающего предварительными напряжениями, может достигнуть величины в два раза большей, чем предел упругого сопротивления однослойного ствола тех же размеров и из того же материала, но свободного от предварительных напряжений.

3. Многослойные стволы

Расчет многослойных стволов производится следующим образом.

Пусть ствол состоит из n слоев, имеющих следующие размеры:

	Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Отношение диаметров	
Слой 1	$d_{i1} = d_i$	d_{a1}	$u_1 = \frac{d_{a1}}{d_{i1}}$	$y_1 = \frac{3u_1^2}{1+2u_1^2}$
Слой 2	d_{i2}	d_{a2}	$u_2 = \frac{d_{a2}}{d_{i2}}$	$y_2 = \frac{3u_2^2}{1+2u_2^2}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
Слой n	d_{in}	$d_{an} = d_a$	$u_n = \frac{d_{an}}{d_{in}}$	$y_n = \frac{3u_n^2}{1+2u_n^2}$
Весь ствол	$d_i = d_{i1}$	$d_a = d_{an}$	$u_R = \frac{d_a}{d_i} = \frac{d_{an}}{d_{i1}}$	$y_R = \frac{3u_R^2}{1+2u_R^2}$

При действии внутреннего давления p, между 1 и 2 слоем возникает давление p_1, между 2 и 3 слоем — давление p_2, между $(n-1)$ и n слоем — давление $p_n - 1$. Таким образом, при выстреле на отдельные слои действуют следующие давления:

	Внутреннее давление	Наружное давление
Слой 1	p	p_1
Слой 2	p_1	p_2
Слой 3	p_2	p_3
.	.	.
.	.	.
Слой n	p_{n-1}	0

Следовательно, для определения максимальных приведенных напряжений в каждом слое (на внутренней поверхности) применимы следующие выражения:

$$\left.\begin{aligned} S_{i1} &= \frac{2}{3}\frac{1}{y_1^2-1}p - \frac{2}{3}\frac{y_1}{y_1^2-1}p_1 \\ S_{i2} &= \frac{2}{3}\frac{1}{y_2^2-1}p_1 - \frac{2}{3}\frac{y_2}{y_2^2-1}p_2 \\ S_{i(n-1)} &= \frac{2}{3}\frac{1}{y_{n-1}^2-1}p_{n-2} - \frac{2}{3}\frac{y_{n-1}}{y_{n-1}^2-1}p_{n-1} \\ S_{in} &= \frac{2}{3}\frac{1}{y_n^2-1}p_{n-1} \end{aligned}\right\} . \qquad (23)$$

Отсюда могут быть вычислены значения давлений p, p_1, ..., p_{n-1}, если известны размеры слоев и даны величины допускаемых напряжений для материала слоев. Назначая допускаемое напряжение σ в качестве максимального значения приведенных напряжений S_{i1}, S_{i2}, ... S_{in}, при расчете по теории наибольшей деформации будем иметь:

$$\left.\begin{aligned} p &= \frac{3}{2}(y_1\, y_2\, y_3 \cdot \cdot \cdot y_n^2 - 1)\sigma \\ p_1 &= \frac{3}{2}(y_2\, y_3 \cdot \cdot \cdot y_n^2 - 1)\sigma \\ p_2 &= \frac{3}{2}(y_3\, y_4 \cdot \cdot \cdot y_n^2 - 1)\sigma \\ &\cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ p_{n-1} &= \frac{3}{2}(y_n^2 - 1)\sigma \end{aligned}\right\} . \qquad (24)$$

Из уравнений системы (24) для p, зная σ, можно определить размеры ствола. Из числа значений от y до y_n или от u_1 до u_n можно произвольно выбрать $(n-1)$ значение. Если конструкция ствола должна удовлетворить требованию возможно малого веса, т. е. отношение $u_R = \frac{d_a}{d_i}$ должно иметь минимальную величину, то путем дифференцирова-

ния можно убедиться, что это условие будет удовлетворено, согласно формуле Гадолина, при

$$\left.\begin{array}{l} u_1 = u_2 = u_3 = \ldots = u_n = \sqrt[n]{u_R} \\ \text{или} \\ y_1 = y_2 = y_3 = \ldots y_n \end{array}\right\}. \qquad (25)$$

Если не имеется каких-либо других оснований для назначения толщин слоев, то разработка проекта ствола ведется в расчете на получение максимального сопротивления согласно формулам (25). Но в большинстве случаев к отдельным слоям предъявляются специальные конструктивные требования. Во всяком случае, наименьшая толщина стенки внутренней трубы (первого слоя), по соображениям обеспечения продольной жесткости и возможности обновления путем вставления ляйнера, должна быть около 0,25 калибра. Затем слой, воспринимающий продольное усилие от затвора, т. е. обычно кожух, должен иметь такие размеры, при которых осевое напряжение не превосходило бы заданного допускаемого напряжения. Остальные слои ствола могут быть спроектированы таким образом, чтобы было удовлетворено условие максимального сопротивления, т. е. равенство отношений u.

Зная величины давлений p, p_1, $p_2 \ldots p_{n-1}$ и подставляя их в формулы, выражающие приведенные напряжения для трубы, подвергнутой внутреннему и наружному давлению, можно определить значения результирующих приведенных напряжений в каждом слое. Общее выражение этого напряжения S для z-го слоя, отвечающее диаметру d, будет иметь вид:

$$S = \frac{2}{3(u_z^2 - 1)}\left\{\left[1 + 2\left(\frac{d_{az}}{d}\right)^2\right] p_{z-1} - \left[u_z^2 + 2\left(\frac{d_{az}}{d}\right)^2\right] p_z\right\}. \qquad (26)$$

Приведенное напряжение в стенке нескрепленного ствола (моноблока), имеющего диаметры, одинаковые с диаметрами многослойного скрепленного ствола, на окружности того же диаметра d выражается формулой:

$$S_p = \frac{2}{3(u_R^2 - 1)}\left[1 + 2\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right] p. \qquad (27)$$

Приведенное напряжение S_0, вызванное в любом слое только скреплением ($p_i = 0$), определится как разность

$$S_0 = S - S_p.$$

При действии другого по величине внутреннего давления p_x напряжение S_0 остается неизменным, а изменяется только S_p, а следовательно и S, — так что будем иметь

$$S = S_0 + S_{px},$$

где

$$S_{px} = \frac{p_x}{p} S_p.$$

Изложенное исследование приведенных напряжений в отдельных слоях целесообразно выполнять в графическом виде, как это сделано в качестве примера на рис. 14 для четырехслойного ствола.

4. Величина натяжения

Если в основу расчета положено условие, чтобы величины наибольших результирующих приведенных напряжений во всех слоях при действии конструкционного давления газов были равны допускаемому напряжению σ, то определение величины натяжения производится следующим образом.

В случае двухслойного скрепленного ствола слой I находится в сжатом, а слой II в растянутом состоянии. Следовательно, величина действительного натяжения δ_1 на поверхности прилегания слоев равна алгебраической сумме увеличения внутреннего диаметра слоя II и уменьшения наружного диаметра слоя I.

Так как относительная тангенциальная деформация ε_t равняется отношению изменения величины диаметра к самому диаметру, то, принимая во внимание знаки, будем иметь:

$$\frac{\delta_1}{d_{a1}} = \Delta_1 = \varepsilon_{ti2} - \varepsilon_{ta1} \qquad (28)$$

или, после подстановки приведенных напряжений, согласно теории наибольшей деформации,

$$E\Delta_1 = S_{ti2} - S_{ta1}. \qquad (29)$$

Через $\Delta_1 = \frac{\delta_1}{d_{a1}}$ обозначена относительная величина действительного натяжения.

Вследствие натяжения между слоями возникает так называемое произведенное давление P_1, действующее в состоянии покоя (при $p_i = 0$). При действии же внутреннего давления p, величина давления между слоями повышается до p_1.

Таким образом при выстреле будем иметь для

I слоя $p_i = p$; $p_a = p_1$,
II „ $p_i = p_1$; $p_a = 0$.

Так как соотношение $S_{ti} - S_{ta} = \frac{4}{3}(p_i - p_a)$ имеет место всегда (см. стр. 31), то будем иметь

$$E\Delta_1 = S_{ti2} - S_{ti1} + \frac{4}{3}(p - p_1). \qquad (30)$$

Полагая допускаемые напряжения обоих слоев равными друг другу, т. е. $S_{ti2}=S_{ti1}=\sigma$, получим

$$E\Delta_1=\frac{4}{3}(p-p_1). \tag{31}$$

Имея в виду, что согласно уравнениям (24)

$$p=\frac{3}{2}(y_1y_2-1)\sigma \quad \text{и} \quad p_1=\frac{3}{2}(y_2-1)\sigma,$$

будем иметь:

$$E\Delta_1=2(y_1-1)y_2\sigma. \tag{32}$$

Отсюда определяется Δ_1, а следовательно и δ_1.

Подобным же образом производится расчет и в случае числа слоев, большего 2. При условии равенства допускаемых напряжений всех слоев при выстреле, величины относительных натяжений между слоями определятся из формул:

$$\left.\begin{aligned} E\Delta_1&=\frac{4}{3}(p-p_1)\\ E\Delta_2&=\frac{4}{3}(p_1-p_2)\\ E\Delta_3&=\frac{4}{3}(p_2-p_3) \text{ и т. д.}\end{aligned}\right\}. \tag{33}$$

Подставляя сюда значения давлений p, p_1 и т. д. из уравнений (24), для четырехслойного ствола, например, получим:

$$\left.\begin{aligned} E\Delta_1&=2(y_1-1)y_2y_3y_4\sigma\\ E\Delta_2&=2(y_2-1)y_3y_4\sigma\\ E\Delta_3&=2(y_3-1)y_4\sigma \text{ и т. д.}\end{aligned}\right\}. \tag{34}$$

Но в отношении практического применения этих формул при скреплении многослойных стволов необходимо учитывать характер самой операции скрепления в том виде, как она обычно осуществляется. В случае, например, четырехслойного ствола сначала производится надевание второго слоя на внутреннюю трубу с производственным натяжением $\vartheta_1=\theta_1 d_{a1}$. После охлаждения эта скрепленная труба, состоящая уже из двух слоев, подвергается точной обточке по наружной поверхности, а затем на нее надевается третий слой с натяжением $\vartheta_2=\theta_2 d_{a2}$. Наконец, после охлаждения и обточки скрепленной трехслойной трубы, производится надевание четвертого слоя с натяжением $\vartheta_3=\theta_3 d_{a3}$. Для получения желаемого распределения напряжений в результате скрепления ствола, эти натяжения θ должны быть увеличены по сравнению с действительными натяжениями Δ на величину той деформации, которая вызывается в предшествующих (внутренних) слоях действием уже произведенного скрепления. Так, например, для получения величины производственного натяжения θ_2 при надевании

третьего слоя, необходимо значение действительного натяжения Δ_2 увеличить на величину деформации наружной поверхности второго слоя, возникшей вследствие надевания второго слоя на первый.

Поэтому будем иметь [19]:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\vartheta_1}{d_{a1}} = \theta_1 = \Delta_1 \\
&\frac{\vartheta_2}{d_{a2}} = \theta_2 = \Delta_2 + \frac{u_1^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 - 1}\Delta_1 \\
&\frac{\vartheta_3}{d_{a3}} = \theta_3 = \Delta_3 + \frac{1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}[(u_1^2 - 1)\Delta_1 + (u_1^2 u_2^2 - 1)\Delta_2] = \\
&\qquad = \Delta_3 + \frac{u_1^2 u_2^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\theta_2 \text{ и т. д.}
\end{aligned}\right\} \quad (35)$$

Величины ϑ_1, ϑ_2, ϑ_3 и т. д. являются теми производственными натяжениями, которые и применяются при нормальном способе скрепления.

Величины натяжений на практике нередко отклоняются от теоретических значений. В таких случаях следует произвести исследование деформаций и напряжений, вызываемых натяжением для наиболее важных сечений ствола, согласно способу, приведенному на стр. 66. Величина натяжения ни в коем случае не должна быть столь значительной, что допускаемое напряжение на сжатие во внутреннем слое было бы превзойдено. В отношении этого напряжения как теория наибольшей деформации, так и теория э.-ф., для данного натяжения дают приблизительно одинаковые величины (см. таблицу 4).

Численное значение относительного натяжения Δ должно находиться в пределах от 1 до $2 \cdot 10^{-3}$. Таким образом речь идет о величине, составляющей всего несколько десятых миллиметра для малых и средних калибров и не превосходящей 1 *мм* для крупных калибров. Поэтому, для обеспечения надлежащей величины натяжения механическая обработка поверхностей прилегания должна быть очень точной и тщательной. После чистовой обработки резцом указанные поверхности обычно подвергаются шлифовке.

В отношении расчета стволов, скрепленных проволокой, значение которых по сравнению со стволами, скрепленными цилиндрами, становится все менее и менее важным, следует обратиться к специальной литературе [20].

---

[19] См. *G. Kaiser*, цитиров. труд, стр. 162.

[20] *G. Moch.* Rev. d'Artillerie 28 (1886) и 29 (1887); *G. Kaiser*, цитиров. труд, стр. 249.

5. Осевые напряжения в стенке ствола

Продольное усилие P, движущее ствол назад (пренебрегая сопротивлением тормоза), равно

$$P = \frac{\pi}{4} d_i^2 p, \tag{36}$$

где через p обозначено давление газов.

Обозначая через f площадь поперечного сечения ствола в произвольном расстоянии от затвора, через G_r — полный вес ствола, а через G_v — вес казенной части ствола до рассматриваемого сечения, для силы инерции, приложенной к этому сечению, будем иметь следующее выражение:

$$\frac{G_r - G_v}{G_r} \cdot \frac{\pi}{4} d_i^2 p. \tag{37}$$

Следовательно, осевое напряжение, вызванное давлением газов, будет равно

$$\sigma_{lp} = \frac{G_r - G_v}{G_r} \frac{d_i^2}{d_a^2 - d_i^2} p = \frac{G_r - G_v}{G_r} \frac{1}{u_R^2 - 1} p. \tag{38}$$

Влияние этого осевого напряжения на тангенциальное приведенное напряжение невелико. Оно не превосходит 3 — 4% от значения последнего (вычисленного не принимая во внимание σ_l) и действует в направлении снижения тангенциального приведенного напряжения на внутренней поверхности ствола. Поэтому, пренебрегая влиянием осевого напряжения, — как это обычно и делается при расчете ствола, — получают как бы некоторый дополнительный запас прочности.

При поверке на продольное усилие кожуха, несущего затвор, в отношении осевого напряжения следует принимать половинный коэфициент безопасности в том предположении, что продольное усилие воспринимается только поперечным сечением кожуха, не принимая во внимание фактически имеющей место разгрузки кожуха за счет других слоев. Это положение сохраняется в силе также и для затворной части ствола.

Другие осевые напряжения возникают вследствие продольного стягивания при скреплении. Если два слоя, имеющие площади поперечного сечения f_1 и f_2 скреплены с натяжением $\delta_1 = \Delta_1 d_{a1}$, то, вследствие продольного стягивания, между слоями возникает сила **P**, удовлетворяющая зависимости:

$$\Delta_1 = \frac{\delta_1}{d_{a1}} = \frac{1}{E} \mathbf{P} \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right).$$

Наличие силы **P** обусловливает появление осевых напряжений в каждом из слоев. В предположении равномерного

распределения этих напряжений в стенках обоих слоев будем иметь [21]:
слой I (напряжения сжатия)

$$\sigma_{1/0} = -\frac{P}{f_1} = -E\Delta\frac{f_2}{f_1+f_2} = -E\Delta\frac{u_1^2(u_2^2-1)}{u_1^2u_2^2-1}, \qquad (39)$$

слой II (напряжения растяжения)

$$\sigma_{2/0} = +\frac{P}{f_2} = +E\Delta\frac{f_1}{f_1+f_2} = +E\Delta\frac{u_1^2-1}{u_1u_2^2-1}. \qquad (40)$$

Если эти напряжения достигают своих полных величин, то ими пренебрегать нельзя. Так, например, при $u_1 = u_2 = 1{,}5$ и $E = 2100000$ *кг/см²* будем иметь:

	при $\Delta = 1\cdot10^{-3}$	при $\Delta = 1{,}9\cdot10^{-3}$
$\sigma_{1/0}$	— 14,6	— 27,7 *кг/мм²*
$\sigma_{2/0}$	+ 6,5	+ 12,3 *кг/мм²*.

Таким образом, во внутренней трубе рассматриваемые напряжения по своей величине оказываются значительно большими, чем осевые напряжения растяжения, вызванные давлением газов.

Однако необходимо здесь же отметить, что осевые напряжения, вызванные скреплением, не распределяются равномерно по сечениям слоев, и что они имеют меньшую величину на поверхности канала, чем на поверхности прилегания слоев. Своей полной величины они так же, как правило, не достигают, потому что при охлаждении частично снимаются, вследствие продольного сдвига слоев по поверхности прилегания. Признаком этого сдвига служит хорошо слышный при скреплении металлический звук. Для облегчения сдвига могут послужить удары молотом во время стягивания внутреннего слоя наружным слоем. В случае коротких колец трение в охлажденном состоянии оказывается недостаточным, чтобы противостоять силе **P**. Приближенный подсчет показывает, что наличие силы **P** обусловлено длиной надеваемого слоя $l = d_{a1}/2\mu$, где μ — коэфициент трения. Полагая $\mu = 0{,}2$ (хотя вообще для μ можно принимать и большее численное значение), получим длину надеваемого слоя $l = 2{,}5\,d_{a1}$. Следовательно, нормальная длина кожуха является всегда достаточной, чтобы вызвать

[21] Эти формулы применимы и к случаю трехслойного ствола. При этом первые два скрепленные слоя следует рассматривать в качестве внутренней трубы, по отношению которой третий слой является наружным, и подставить в формулу соответствующие размеры и величину натяжения.

осевые напряжения от скрепления. При скреплении же короткими кольцами осевые напряжения в значительной мере снимаются. Осевые напряжения от скрепления можно значительно уменьшить так же и в случае длинных скрепляющих элементов путем специального способа охлаждения в процессе скрепления. Этот способ, являющийся обычным в США, заключается в том, что прилегание скрепляемых элементов происходит не сразу по всей поверхности, а постепенно от одного конца к другому (см. стр. 79).

В случае очень значительных по величине осевых напряжений, вызванных скреплением, при выстреле может произойти частичное снятие их, вследствие сотрясения (вибрации), в результате чего происходят небольшие изменения размеров ствола, которые не следует смешивать с деформациями, обязанными действию чрезмерно высокого давления газов.

Сведений в литературе об опытах по определению величин встречающихся на практике осевых напряжений при различных методах скрепления (путем измерения деформаций скрепленных элементов ствола) автор до настоящего времени не встречал.

Влияние осевых напряжений при расчете размеров ствола по тангенциальному приведенному напряжению можно, как правило, не принимать во внимание. Если же представляется желательным их учесть, то следует произвести расчет согласно вышеизложенному, а затем при графическом исследовании отдельных поперечных сечений внести соответствующие поправки в эпюры напряжений.

Г. Расчет орудийных стволов по теории энергии формоизменения

1. Однослойный ствол (моноблок)

Формулы, относящиеся к однослойному, нескрепленному стволу, подвергнутому только внутреннему или только наружному давлению при условии $\sigma_l = 0$, были приведены на стр. 33—35 и обсуждены сравнительно с теорией наибольшей деформации.

2. Многослойный ствол

Формулы для расчета многослойного ствола в предположении $\sigma_l = 0$ не будут показательными. Рассматривая ствол как трубу, замкнутую с обоих концов и подвергающуюся действию давлений p_i и p_a не только на ее цилиндрические поверхности, но и на торцы, будем иметь в стенке

ствола продольное усилие, выражающееся следующей формулой:

$$\sigma_l = \frac{1}{u^2 - 1}(p_i - u^2 p_a). \tag{41}$$

Принимая во внимание выражения (1) и (2), в данном случае[22] получим:

$$\sigma_l = \frac{1}{2}(\sigma_{pt} + \sigma_{pr}). \tag{42}$$

Подставляя это выражение σ_l в общую формулу для S_g (5), для рассматриваемого частного случая окончательно будем иметь:

$$S_g = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_{pt} - \sigma_{pr}). \tag{43}$$

При принятом выше допущении относительно величины σ_l можно определить полное (суммарное) приведенное напряжение, обусловленное совместным действием скрепления и давления газов, также и по теории э.-ф., путем сложения соответствующих приведенных напряжений $S_{\sigma 0}$ и S_{gp}, принимая во внимание их знаки:

$$S_g = S_{g0} + S_{gp}.$$

Для трубы, свободной от предварительных напряжений, подвергнутой действию внутреннего давления p_i и наружного давления p_a, подставив значения σ_{pt} и σ_{pr} из (1) и (2), будем иметь выражение приведенного напряжения

$$S_{gp} = \frac{\sqrt{3}}{u^2 - 1}\left(\frac{d_a}{d}\right)^2 (p_i - p_a), \tag{44}$$

отвечающего диаметру d.

Отсюда следует, что максимальное приведенное напряжение (на внутренней поверхности трубы) равно:

$$\left.\begin{aligned} S_{gpi} &= \sqrt{3}\,\frac{u^2}{u^2 - 1}(p_i - p_a), \\ \text{а приведенное напряжение на наружной поверхности } & \\ S_{gpa} &= \sqrt{3}\,\frac{1}{u^2 - 1}(p_i - p_a) \end{aligned}\right\}. \tag{45}$$

---

[22] Этому осевому напряжению при чисто упругой деформации трубы соответствует осевая деформация $\varepsilon_l = \frac{1}{3}\frac{\sigma_l}{E} = \frac{1}{E}\frac{1}{3(u^2 - 1)}(p_i - u^2 p_a)$ при допущении, что коэфициент Пуассона $1/m = 1/3$. В области пластической деформации трубы $1/m = 1/2$ и, следовательно, при осевом напряжении, равном $1/2\,(\sigma_t + \sigma_r)$, остаточная осевая деформация будет равна нулю.

Использование этих формул для расчета приведенных напряжений в отдельных слоях скрепленного ствола при одновременном действии давлений p, p_1, p_2 и p_3 вполне допустимо, так как получающиеся при этом ошибки в применении к орудийным стволам остаются в узких пределах и находятся в области влияния напряжений от скрепления. Формулы (44) и (45) применимы также для расчета однослойного ствола, имеющего стенки обычной толщины. И только в случае очень тонкостенной трубы следует принимать во внимание влияние осевого напряжения.

Рассматривая двухслойный скрепленный ствол в момент выстрела, будем иметь (см. стр. 47), что на I слой действуют внутреннее давление p и наружное давление p_1, а на II слой — только внутреннее давление p_1. Следовательно, приведенные напряжения будут:

в слое II $$S_{gi2} = \sqrt{3}\,\frac{u_2^2-1}{u_2^2}\,p_1$$

в слое I $$S_{gi1} = \sqrt{3}\,\frac{u_1^2}{u_1^2-1}\,(p-p_1),$$

откуда

$$p = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_1^2-1}{u_1^2}\,S_{gi1} + \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_2^2-1}{u_2^2}\,S_{gi2}. \qquad (46)$$

При $S_{gi1} = S_{gi2} = \sigma$ получим:

$$p = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{u_1^2-1}{u_1^2} + \frac{u_2^2-1}{u_2^2}\right)\sigma \quad \text{и} \quad p_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_2^2-1}{u_2^2}\,\sigma. \qquad (47)$$

Соответственно этому, для многослойного ствола (например четырехслойного) при условии равенства наибольших приведенных напряжений во всех слоях в момент выстрела будем иметь следующие уравнения.

$$p - p_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_1^2-1}{u_1^2}\,\sigma,$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_2^2-1}{u_2^2}\,\sigma,$$

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_3^2-1}{u_3^2}\,\sigma,$$

$$p_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{u_4^2-1}{u_4^2}\,\sigma.$$

Складывая эти равенства, получим:

$$p = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{u_1^2-1}{u_1^2} + \frac{u_2^2-1}{u_2^2} + \frac{u_3^2-1}{u_3^2} + \frac{u_4^2-1}{u_4^2}\right)\sigma^* \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

---

* Это выражение можно представить также и в другом виде

$$p = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(4 - \frac{1}{u_1^2} - \frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_3^2} - \frac{1}{u_4^2}\right)\sigma, \qquad (48^1)$$

который используется автором для обобщения на n слоев. (*Прим. ред.*).

или вообще для n слоев

$$\left.\begin{aligned}
p &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(n - \frac{1}{u_1^2} - \frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_3^2} - \ldots - \frac{1}{u_n^2}\right)\sigma \\
p_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(n - 1 - \frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_3^2} - \ldots - \frac{1}{u_n^2}\right)\sigma \\
p_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(n - 2 - \frac{1}{u_3^2} - \frac{1}{u_4^2} - \ldots - \frac{1}{u_n^2}\right)\sigma \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
p_{n-1} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(1 - \frac{1}{u_n^2}\right)\sigma
\end{aligned}\right\}. \quad (49)$$

Формула, выражающая p, применима для расчета ствола в случае трех, четырех и пяти слоев [23]. При этом следует иметь в виду, что если p и σ даны, то из числа n слоев для $(n-1)$ слоя отношения u являются наперед заданными величинами (см. стр. 47).

В качестве условия, определяющего максимальное сопротивление четырехслойного ствола, имеющего внутренний диаметр d_i, а наружный — d_a, остается в силе то же самое условие, которое было указано для теории наибольшей деформации, а именно

$$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = \sqrt[4]{u_R}. \quad (25)$$

В таблице 6 дано сопоставление численных значений $\frac{p}{\sigma}$, полученных в результате расчета по теории наибольшей деформации и теории э.-ф. стволов, состоящих из одного, двух, трех и четырех слоев и имеющих стенки толщиной от $^1/_2$ до 2 калибров. Так как при расчете принято условие равенства допускаемых напряжений, то указанные значения дают возможность и непосредственного сравнения величин внутренних давлений. Кроме того, в таблице дано сравнение максимальных величин напряжений на внутренней поверхности трубы, обусловленных скреплением. Эти величины приведены также в относительном виде $\left(\frac{S_0}{\sigma}\right)$.

Данные таблицы 6 показывают, что особенно нерациональным является увеличение толщины стенки свыше одного калибра для ствола-моноблока, свободного от предварительных напряжений, так как в результате этого увеличения достигается лишь небольшое повышение допускаемого давления газов, но зато имеет место весьма значительное возрастание веса ствола.

---

[23] Распространение этой формулы на большое число слоев, имеющих очень тонкие стенки (проволочное скрепление и т. д.), является недопустимым, так как тогда должно быть принято во внимание влияние осевых напряжений.

Таблица 6. Сравнительные данные для ствола-моноблока и многослойных скрепленных стволов

Величины внутреннего давления, отвечающие одинаковым допускаемым напряжениям материала, при условии разделения стенки заданной толщины на 1, 2, 3 и 4 слоя. Значения необходимого для этого приведенного напряжения S_0, вызванного скреплением на внутренней поверхности ствола

Общая толщина стенки ствола в калибрах		0,5 d_i	0,75 d_i	1,0 d_i	1,5 d_i	2,0 d_i
$u_R = d_a/d_i$		2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Вес 1 погонного метра ствола в *кг*		1,85 d_i^2	3,24 d_i^2	4,93 d_i^2	9,24 d_i^2	14,78 d_i^2
По теории наибольшей деформации						
Ствол-моноблок	$\frac{p}{\sigma}$	0,500	0,583	0,632	0,682	0,706
Двухслойный ствол	$\frac{p}{\sigma}$	0,660	0,844	0,980	1,167	1,289
	$\frac{S_0}{\sigma}$	—0,320	—0,446	—0,551	—0,711	—0,827
Трехслойный твол	$\frac{p}{\sigma}$	0,730	0,963	1,153	1,441	1,653
	$\frac{S_0}{\sigma}$	—0,459	—0,651	—0,825	—1,114	—1,336
Четырехслойный ствол	$\frac{p}{\sigma}$	0,762	1,030	1,254	1,610	1,888
	$\frac{S_0}{\sigma}$	—0,525	—0,766	—0,961	—1,362	—1,674
По теории энергии формоизменения						
Ствол-моноблок	$\frac{p}{\sigma}$	0,433	0,485	0,513	0,541	0,554
Двухслойный ствол	$\frac{p}{\sigma}$	0,577	0,693	0,770	0,866	0,924
	$\frac{S_0}{\sigma}$	—0,333	—0,429	—0,500	—0,600	—0,667
Трехслойный ствол	$\frac{p}{\sigma}$	0,641	0,792	0,897	1,043	1,140
	$\frac{S_0}{\sigma}$	—0,480	—0,633	—0,749	—0,927	—1,056
Четырехслойный ствол	$\frac{p}{\sigma}$	0,676	0,849	0,976	1,155	1,277
	$\frac{S_0}{\sigma}$	—0,561	—0,750	—0,902	—1,133	—1,303

В отношении многослойных стволов увеличение допускаемого давления газов (предела упругого сопротивления) ограничивается величинами вызванных скреплением напряжений, которые не должны превосходить предела упругости или текучести материала. Поэтому устройство стенки ствола более, чем из четырех слоев, не дает вообще преимуществ с точки зрения теоретической прочности.

3. Величина натяжения

Независимо от теории прочности, принятой за основу, согласно (28) имеем:

$$\Delta_1 = \varepsilon_{ti2} - \varepsilon_{ta1}$$
$$\Delta_2 = \varepsilon_{ti3} - \varepsilon_{ta2} \text{ и т. д.}$$

Но из (7) вообще следует, что

$$E\varepsilon_{pti} = \frac{2}{3(u^2-1)}\left[(1+2u^2)p_i - 3u^2 p_a\right] - \frac{\sigma_l}{3},$$
$$E\varepsilon_{pta} = \frac{2}{3(u^2-1)}\left[3p_i - (2+u^2)p_a\right] - \frac{\sigma_l}{3}.$$

Подставляя значение σ_l из (41), будем иметь

$$\left.\begin{aligned} E\varepsilon_{pti} &= \frac{1}{3(u^2-1)}\left[(1+4u^2)p_i - 5u^2 p_a\right] \\ E\varepsilon_{pta} &= \frac{1}{3(u^2-1)}\left[5p_i - (4+u^2)p_a\right] \end{aligned}\right\}. \qquad (50)$$

В момент выстрела для отдельных слоев имеем:

	Отношение диаметров	Внутреннее давление	Наружное давление
Слой I	u_1	p	p_1
Слой II	u_2	p_1	p_2
Слой III	u_3	p_2	p_3
Слой IV	u_4	p_3	—

Имея в виду эти обозначения, из уравнений (50) получим:

$$E\Delta_1 = -\frac{5}{3}\frac{1}{u_1^2-1}p + \frac{5}{3}\frac{u_1^2u_2^2-1}{(u_1^2-1)(u_2^2-1)}p_1 - \frac{5}{3}\frac{u_2^2}{u_2^2-1}p_2; \qquad (51)$$

$$E\Delta_2 = -\frac{5}{3}\frac{1}{u_2^2-1}p_1 + \frac{5}{3}\frac{u_2^2u_3^2-1}{(u_2^2-1)(u_3^2-1)}p_2 - \frac{5}{3}\frac{u_3^2}{u_3^2-1}p_3; \qquad (52)$$

$$E\Delta_3 = -\frac{5}{3}\frac{1}{u_3^2-1}p_2 + \frac{5}{3}\frac{u_3^2u_4^2-1}{(u_3^2-1)(u_4^2-1)}p_3. \qquad (53)$$

Эти формулы применимы для всех значений давлений p, p_1, p_2 и т. д. и, следовательно, для всех величин натяжений.

Для того чтобы определить те натяжения, которые во всех слоях ствола при действии давления газов p вызывают одинаковые максимальные приведенные напряжения σ, следует подставить значения давлений p, p_1 и т. д. согласно формул (48) или (49), которые отвечают условию одинаковости напряжений σ.

Тогда формулы (51), (52) и (53) могут быть значительно упрощены, а именно:

$$E\Delta_3 = \frac{5}{3}\frac{1}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{1}{u_3^2}\right)\sigma = \frac{5}{3}(p_2 - p_3); \tag{54}$$

$$E\Delta_2 = \frac{5}{3}\frac{1}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{1}{u_2^2}\right)\sigma = \frac{5}{3}(p_1 - p_2); \tag{55}$$

$$E\Delta_1 = \frac{5}{3}\frac{1}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{1}{u_1^2}\right)\sigma = \frac{5}{3}(p - p_1). \tag{56}$$

Как было указано на стр. 50, эти величины натяжений должны быть увеличены для того, чтобы учесть деформации на наружной поверхности ранее надетых слоев.

Необходимые поправки вносятся следующим образом.

При надевании второго слоя на первый между слоями возникает давление $p_1 = \mathbf{p}_1$. Величина последнего определится из уравнения (51), если положить $p = 0$ и $p_2 = 0$. Тогда

$$E\Delta_1 = \frac{5}{3}\frac{u_1^2 u_2^2 - 1}{(u_1^2 - 1)(u_2^2 - 1)}\mathbf{p}_1,$$

а отсюда

$$\mathbf{p}_1 = \frac{3}{5}\frac{(u_1^2 - 1)(u_2^2 - 1)}{u_1^2 u_2^2 - 1}\Delta_1 E. \tag{57}$$

Это, внутреннее для второго слоя, давление дает следующую деформацию на наружной поверхности слоя:

$$\Delta_2' = \varepsilon_{a2}\frac{1}{E}\left(\frac{2}{u_2^2 - 1}\mathbf{p}_1 - \frac{\sigma_l}{3}\right) = \frac{1}{E}\frac{5}{3}\frac{1}{u_2^2 - 1}\mathbf{p}_1, \tag{58}$$

так как принимается, что $\sigma_l = \frac{1}{u_2^2 - 1}\mathbf{p}_1$ (см. уравнение 41).

Подставляя значение $\mathbf{p}_1$ в (58), получим:

$$\Delta_2' = \frac{u_1^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 - 1}\Delta_1 \text{ и } \theta_2 = \Delta_2 + \Delta_2'. \tag{59}$$

Аналогичным способом получается Δ_3'. Давление $\mathbf{p}_2 = \frac{3}{5}\frac{(u_1^2 u_2^2 - 1)(u_3^2 - 1)}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\theta_2 E$ вызывает на наружной поверхности третьего слоя деформацию $\Delta_3' = \varepsilon_{a3} = \frac{1}{E}\frac{5}{3}\frac{1}{u_3^2 - 1}\mathbf{p}_2$.

При $\theta_2 = \Delta_2 + \Delta_2'$ окончательно получим

$$\Delta_3' = \frac{u_1^2 u_2^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\theta_2. \tag{60}$$

Таким же образом найдем:

$$\Delta_4' = \frac{u_1^2 u_2^2 u_3^3 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 u_4^2 - 1}\theta_3. \qquad (61)$$

Следовательно, поправки оказываются одинаковыми с теми, которые были выведены при расчете по теории наибольшей деформации. Величины производственных натяжений будут иметь следующий вид:

$$\frac{\vartheta_1}{d_{a1}} = \theta_1 = \Delta_1,$$

$$\frac{\vartheta_2}{d_{a2}} = \theta_2 = \Delta_2 + \frac{u_1^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 - 1}\theta_1,$$

$$\frac{\vartheta_3}{d_{a3}} = \theta_3 = \Delta_3 + \frac{u_1^2 u_2^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\theta_2,$$

$$\frac{\vartheta_4}{d_{a4}} = \theta_4 = \Delta_4 + \frac{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 u_4^2 - 1}\theta_3.$$

При этих значениях натяжений величины полных приведенных напряжений на внутренних поверхностях всех слоев в момент выстрела будут равны σ. Для того, чтобы определить отсюда соответствующие напряжения в состоянии покоя, т. е. напряжения, вызванные только скреплением, следует вычесть из полных напряжений величины напряжений, обусловленных действием внутреннего давления p в нескрепленном стволе-моноблоке с одинаковой толщиной стенки (при чисто упругой деформации) в соответствующих местах поперечного сечения. Общее выражение для последних напряжений для любого диаметра d имеет вид:

$$S_{gp} = \frac{\sqrt{3}}{u_R^2 - 1}\left(\frac{d_{aR}}{d}\right)^2 p, \qquad (62)$$

где d_{aR} — наружный диаметр ствола, а $u_R = d_a/d_i$.

Таким образом, в случае четырехслойного ствола, приведенные напряжения, вызванные скреплением на внутренних поверхностях отдельных слоев, будут определяться выражениями:

$$\left.\begin{array}{ll}
\text{слой I (внутр. труба)} & S_{goi_{\mathrm{I}}} = \sigma - \sqrt{3}\,\dfrac{u_R^2}{u_R^2 - 1}\,p \\
\text{слой II} & S_{goi_{\mathrm{II}}} = \sigma - \sqrt{3}\,\dfrac{(u_2 u_3 u_4)^2}{u_R^2 - 1}\,p \\
\text{слой III} & S_{goi_{\mathrm{III}}} = \sigma - \sqrt{3}\,\dfrac{(u_3 u_4)^2}{u_R^2 - 1}\,p \\
\text{слой IV} & S_{goi_{\mathrm{IV}}} = \sigma - \sqrt{3}\,\dfrac{u_4^2}{u_R^2 - 1}\,p
\end{array}\right\}. \qquad (63)$$

Здесь можно давление p заменить его выражением согласно формуле (48). Тогда, например, для I слоя будем иметь:

$$S_{goi_1} = \sigma\left[1 - \frac{u_R^2}{u_R^2 - 1}\left(\frac{u_1^2 - 1}{u_1^4} + \frac{u_2^2 - 1}{u_2^2} + \frac{u_3^2 - 1}{u_3^2} + \frac{u_4^2 - 1}{u_4^2}\right)\right]. \quad (64)$$

Выведенные формулы служат также для расчета трехслойных и двухслойных стволов, если положить $u_4 = 1$ или $u_4 = u_3 = 1$ соответственно.

Применимость этих формул ограничивается лишь случаем, когда величины натяжений подобраны таким образом, что значения полных приведенных напряжений на внутренних поверхностях всех слоев в момент выстрела равны σ.

Наибольшее приведенное напряжение на поверхности канала ствола никогда не должно превосходить допускаемого напряжения материала на сжатие. Это последнее напряжение принимается равным пределу упругости $\sigma_E = \sigma_{0,01}$ или $\sigma_{0,03}$. Таким образом будем иметь условие

$$\left(\sqrt{3}\,\frac{u_R^2}{u_R^2 - 1}\,p - \sigma\right) \leqq \sigma_E. \quad (65)$$

4. Приведенные напряжения, вызванные скреплением при заданных величинах натяжений

В результате надевания второго слоя на первый с натяжением $\vartheta_1 = \theta_1 d_{a1} = \Delta_1 d_{a1}$ получается двухслойный ствол, между слоями которого в состоянии покоя действует давление $\mathbf{p}_1$. В отношении первого слоя это давление является наружным, а в отношении второго слоя — внутренним.

Согласно (28) и (29) всегда имеет место равенство

$$E\Delta_1 = E\theta_1 = E(\varepsilon_{ti2} - \varepsilon_{ta1}).$$

Из формулы (44) и (57) следует, что приведенные напряжения, вызванные скреплением в первом и втором слое, можно выразить в следующем виде:

слой I

$$S_{0p1} = -\sqrt{3}\,\frac{1}{u_1^2 - 1}\,\frac{d_{a1}^2}{d^2}\,\mathbf{p}_1 =$$

$$= -0{,}6\sqrt{3}\,\frac{u_2^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 - 1} \cdot E\theta_1\left(\frac{d_{a1}}{d}\right)^2, \quad (66)$$

слой II

$$S_{0p1} = +\sqrt{3}\,\frac{1}{u_2^2 - 1} \cdot \frac{d_{a2}^2}{d^2}\,\mathbf{p}_1 =$$

$$= +0{,}6\sqrt{3}\,\frac{u_1^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 - 1}\,E\theta_1\left(\frac{d_{a2}}{d}\right)^2. \quad (67)$$

Если теперь, после обточки скрепленной двухслойной трубы надеть на нее III слой с натяжением $\vartheta_2 = \theta_2 d_{a2}$, то

на поверхности прилегания последнего слоя возникнет давление $\mathbf{p}_2$, которое вызовет дополнительно напряжение $S_{\text{ор}2}$. Тогда давление $\mathbf{p}_2$ в отношении ранее скрепленной двухслойной трубы, рассматриваемой как одно целое, будет наружным, а в отношении III слоя — внутренним, причем, согласно предыдущему, будем иметь:

$$\mathbf{p}_2 = \frac{3}{5}\,\frac{(u_1^2 u_2^2 - 1)(u_3^2 - 1)}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\,E\theta_2. \tag{68}$$

Следовательно, для слоя (I+II):

$$S_{0\text{р}2} = -\sqrt{3}\,\frac{1}{u_1^2 u_2^2 - 1}\left(\frac{d_{a2}}{d}\right)^2 \mathbf{p}_2 =$$

$$= -0{,}6\sqrt{3}\,\frac{u_3^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\,E\theta_2\left(\frac{d_{a2}}{d}\right)^2; \tag{69}$$

для слоя III:

$$S_{\text{р}2} = +\sqrt{3}\,\frac{1}{u_3^2 - 1}\left(\frac{d_{a3}}{d}\right)^2 \mathbf{p}_2 =$$

$$= +0{,}6\sqrt{3}\,\frac{u_1^2 u_2^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\,E\theta_2\left(\frac{d_{a3}}{d}\right)^2. \tag{70}$$

Аналогичным образом после надевания IV слоя с натяжением $\vartheta_3 = \theta_3 d_{a3}$ получим:

$$\mathbf{p}_3 = \frac{3}{5}\,\frac{(u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1)(u_4^2 - 1)}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 u_4^2 - 1}\,E\theta_3 \tag{71}$$

и дополнительные напряжения от скрепления для слоя (I + II + III):

$$S_{0\text{р}3} = -0{,}6\sqrt{3}\,\frac{u_4^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 u_4^2 - 1}\,E\theta_3\left(\frac{d_{a3}}{d}\right)^2; \tag{72}$$

для слоя IV:

$$S_{0\text{р}3} = +0{,}6\sqrt{3}\,\frac{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 u_4^2 - 1}\,E\theta_3\left(\frac{d_{a4}}{d}\right)^2. \tag{73}$$

Тогда полные величины приведенных напряжений, вызванных скреплением, будут:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{для слоя I и II} \ldots\ldots & S_0 = S_{0\text{р}1} + S_{0\text{р}2} + S_{0\text{р}3} \\ \text{для слоя III} \ldots\ldots & S_0 = S_{0\text{р}2} + S_{0\text{р}3} \\ \text{для слоя IV} \ldots\ldots & S_0 = S_{0\text{р}3} \end{array}\right\}, \tag{74}$$

где для каждого слоя всякий раз должны быть подставлены соответствующие значения. Полное приведенное напряжение в момент выстрела будет равно $S = S_p + S_0$, где

$$S_p = \frac{\sqrt{3}}{u_R^2 - 1}\left(\frac{d_{aR}}{d}\right)^2 p.$$

Изложенное рекомендуется проделать в численном виде.

5. Приведенные напряжения, вызванные скреплением, в случае $\sigma_l = 0$

В предыдущем изложении в основу расчета многослойного ствола было положено, согласно формуле (42), допущение, что $\sigma_l = \frac{1}{2}\left(\sigma_{pt} + \sigma_{pr}\right)$.

При ином значении σ_l определение $\mathbf{p}_1$ производится следующим образом.

Так как давление $\mathbf{p}_1$ в отношении II слоя является внутренним, а в отношении I слоя — наружным, то, согласно формулам (9) и (13),

$$E\varepsilon_{ti2} = \frac{2}{3}\frac{1}{y_2^2 - 1}\mathbf{p}_1 - \frac{\sigma_{l2}}{3} \qquad (75)$$

$$E\varepsilon_{ti1} = -\frac{2}{3}\left(\frac{1}{y_1^2 - 1}\right)\mathbf{p}_1 - \frac{\sigma_{l1}}{3}. \qquad (76)$$

Следовательно,

$$E\theta_1 = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{y_1^2 - 1} + \frac{1}{y_2^2 - 1} - 1\right)\mathbf{p}_1 + \frac{\sigma_{l1} - \sigma_{l2}}{3}. \qquad (77)$$

Отсюда можно рассчитать давление $\mathbf{p}_1$, а также напряжения, вызванные этим давлением, для любых значений σ_l. Аналогичным способом производится определение $\mathbf{p}_2$ и $\mathbf{p}_3$. Но необходимо иметь в виду, что найденные согласно теории э.-ф. приведенные напряжения, вызванные скреплением в различных слоях, теперь нельзя уже будет складывать, чтобы определить полные величины этих напряжений. Если представляется желательным произвести расчет для σ_l в общем виде, а следовательно также и для $\sigma_l = 0$, — то отдельные, вызванные давлениями $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ $\mathbf{p}_3$, напряжения σ_{t0} и σ_{r0} в различных слоях можно определить из формул (1) и (2). Отдельные напряжения в каждом направлении должны быть сложены, принимая во внимание их знаки, подобно тому как производилось непосредственное сложение приведенных напряжений в предыдущем изложении. Тогда получим полные напряжения в состоянии покоя σ_{r0} и σ_{t0}, которые вместе с принятым осевым напряжением σ_{l0} дадут полное приведенное напряжение, вызванное скреплением, согласно формуле (5):

$$S_{g0} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_{t0} - \sigma_{r0})^2 + (\sigma_{r0} - \sigma_{l0})^2 + (\sigma_{l0} - \sigma_{t0})^2}.$$

Для того, чтобы определить приведенные напряжения в момент выстрела, следует в общем случае опять прибегнуть к сложению напряжений. Таким образом, если σ_{pt} есть

тангенциальное напряжение, вызванное только давлением газов, то полное тангенциальное напряжение будет $\sigma_t = \sigma_{pt} + \sigma_{0t}$. Точно также $\sigma_r = \sigma_{pr} + \sigma_{0r}$. Полное же приведенное напряжение в момент выстрела будет

$$S_g = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_t)^2}.$$

Подобный расчет является длительным и кропотливым. Как правило, применяется упрощенный способ, изложенный в предыдущих параграфах.

Полагая, как это делается обычно при расчете по теории наибольшей деформации $\sigma_{l1} = \sigma_{l2} = 0$ будем иметь

$$E\theta_1 = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{y_1 - 1} + \frac{1}{y_2 - 1} - 1\right)\mathbf{p}_1. \qquad (78)$$

Соответственно получим

$$E\theta_2 = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{y_{1,2} - 1} + \frac{1}{y_3 - 1} - 1\right)\mathbf{p}_2 \qquad (79)$$

$$E\theta_3 = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{y_{1,2,3} - 1} + \frac{1}{y_4 - 1} - 1\right)\mathbf{p}_3, \qquad (80)$$

где

$$y_{1,2} = \frac{3(u_1 u_2)^2}{2(u_1 u_2)^2 + 1}; \quad y_{1,2,3} = \frac{3(u_1 u_2 u_3)^2}{2(u_1 u_2 u_3)^2 + 1}.$$

Расчет производится при помощи этих значений $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ и $\mathbf{p}_3$, если нужно определить приведенные напряжения в состоянии покоя при заданных величинах натяжения по теории наибольшей деформации.

Далее расчет следует вести так же, как это делалось в предыдущем изложении, но только в общую формулу (7) для приведенного напряжения по теории наибольшей деформации следует подставить $\sigma_l = 0$ и

для	p_a	p_i	u	d_a
а) при надевании II слоя на I:				
внутренняя труба — слой I	$\mathbf{p}_1$	0	u_1	d_{a1}
наружная труба „ II	0	$\mathbf{p}_1$	u_2	d_{a2}
б) при надевании III слоя на (I + II):				
внутренняя труба слой (I + II)	$\mathbf{p}_2$	0	$(u_1\ u_2)$	d_{a2}
наружная труба — слой III	0	$\mathbf{p}_2$	u_3	d_{a3}
в) при надевании IV слоя на (I + II + III):				
внутренняя труба — слой (I + II + III)	$\mathbf{p}_3$	0	$(u_1\ u_2\ u_3)$	d_{a3}
наружная труба — слой IV	0	$\mathbf{p}_3$	u_4	d_{a4}

Для определения полного приведенного напряжения, вызванного скреплением, приведенные напряжения, найденные

из формулы (7) согласно теории наибольшей деформации, опять складываются, принимая во внимание их знаки.

В отношении нагретого во время стрельбы ствола необходимо иметь в виду, что модуль упругости E, а следовательно и пропорциональные ему напряжения, произведенные скреплением, уменьшаются. Так, например, для хромоникелевой стали имеем:

при 20° . . . . . $E = 2110000$ *кг/см²*
„ 400° . . . . . $E = 1820000$ „
„ 500° . . . . . $E = 1680000$ „

Д. Численный пример расчета орудийного ствола

Для расчета возьмем 28-*см* ствол, состоящий из четырех слоев и изготовленный из термически обработанной, хромоникелевой стали с пределом упругости (равным допускаемому приведенному напряжению) в 40 *кг/мм²* и модулем упругости $E = 21000$ *кг/мм²*. Рабочее давление газов равно 3000 *кг/см²*, а конструкционное давление $p = 4500$ *кг/см²*. Наименьшая толщина стенки должна составлять 0,25 калибра, т. е. 70 *мм*. Размеры остальных слоев должны быть определены, исходя из условия максимального сопротивления ствола.

1. Расчет по теории наибольшей деформации

Имеем $u_1 = 1{,}5$ и из таблицы 3 получаем $y_1 = 1{,}227$.

Так как размеры остальных слоев должны удовлетворять условию максимального сопротивления, то будем иметь

$$u_2 = u_3 = u_4 \text{ и } y_2 = y_3 = y_4.$$

При конструкционном давлении газов $p = 4500$ *кг/см²* приведенные напряжения на внутренних поверхностях всех слоев должны быть равны $\sigma = 40$ *кг/мм²*.

Из формулы (26): $p = \frac{3}{2}(y_1\, y_2\, y_3\, y_4 - 1)\sigma$ находим, что $y_1\, y_2\, y_3\, y_4 = 1{,}75$.

Так как $y_1 = 1{,}227$, то $y_2\, y_3\, y_4 = y_2^3 = 1{,}425$.

Отсюда $y_2 = y_3 = y_4 = 1{,}125$.

Следовательно: $u_1 = 1{,}5$; $u_2 = u_3 = u_4 = 1{,}225$ и размеры отдельных слоев будут:

$$d_i = d_{i1} = 280 \text{ мм}$$
$$d_{a1} = d_{i2} = 420 \text{ „}$$
$$d_{a2} = d_{i3} = 515 \text{ „}$$
$$d_{a3} = d_{i4} = 631 \text{ „}$$
$$d_a = d_{a4} = 774 \text{ „}$$

Давления между слоями при конструкционном давлении p, согласно формуле (24), суть

$$p_1 = \frac{3}{2}(y_2\ y_3\ y_4 - 1)\sigma = 2557\ кг/см^2,$$
$$p_2 = \frac{3}{2}(y_3\ y_4 - 1)\sigma = 1602\ \text{„}$$
$$p_3 = \frac{3}{2}(y_4 - 1)\sigma = 754\ \text{„}.$$

Относительные производственные натяжения при $E = 21000\ кг/мм^2$ определятся из формул (35):

$$\theta_1 = \frac{4}{3}\frac{p - p_1}{E} = 1{,}228 \cdot 10^{-3}$$
$$\theta_2 = \frac{4}{3}\frac{p_1 - p_2}{E} + \frac{u_1^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 - 1}\theta_1 = 1{,}253 \cdot 10^{-3},$$
$$\theta_3 = \frac{4}{3}\frac{p_2 - p_3}{E} + \frac{u_1^2 u_2^2 - 1}{u_1^2 u_2^2 u_3^2 - 1}\theta_2 = 1{,}270 \cdot 10^{-3}.$$

Линейные величины производственных натяжений будут:

$$\vartheta_1 = \theta_1 d_{a1} = 0{,}52\ мм,$$
$$\vartheta_2 = \theta_2 d_{a2} = 0{,}65\ \text{„}$$
$$\vartheta_3 = \theta_3 d_{a3} = 0{,}80\ \text{„}$$

Характер распределения отвечающих этим натяжениям приведенных напряжений в отдельных слоях при конструкционном давлении газов определяется при помощи формул (26), подставив туда численные значения p, p_1, p_2 и p_3. Эпюры полных приведенных напряжений S представлены на рис. 14. Вычитая из этих напряжений приведенные напряжения S', вызываемые действием только давления 4500 $кг/см^2$ в стенке ствола-моноблока, имеющего диаметры — внутренний 280 $кг/мм^2$ и наружный 774 $мм$, получим приведенные напряжения S_0, обусловленные действием только скрепления. Складывая же эти последние напряжения S_0 с приведенными напряжениями S'_{3000}, возникающими в стенке ствола в результате действия только внутреннего давления 3000 $кг/см^2$, получим величины полных приведенных напряжений S_{3000}, обусловленных совместным действием указанного давления и скрепления.

2. Расчет по теории энергии формоизменения

Определив, аналогично предыдущему, размеры слоев

$d_i = d_{i1} = 280\ мм,$ $\quad d_{a3} = d_{i4} = 631\ мм,$
$d_{a1} = d_{i2} = 420\ \text{„}$ $\quad d_a = d_{a4} = 774\ \text{„}$
$d_{a2} = d_{i3} = 515\ \text{„}$

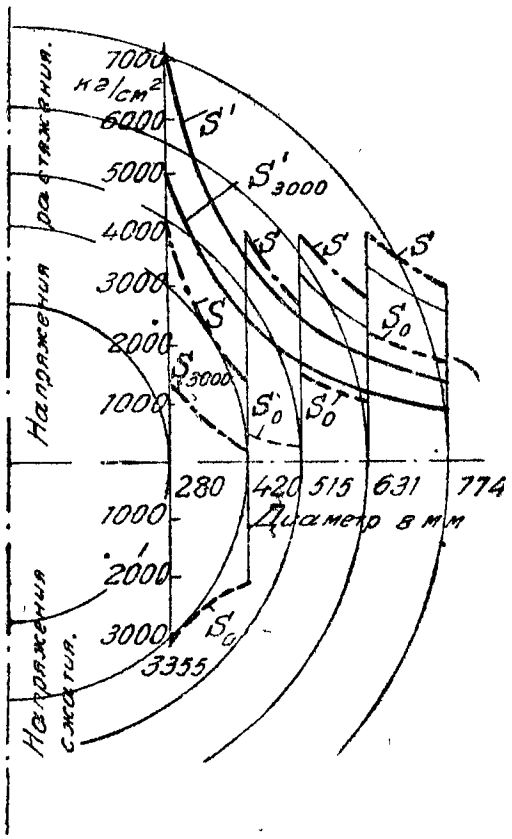


Рис 14. Приведенные напряжения в стенке четырехслойного ствола 28-*см* калибра согласно теории наибольшей деформации

S_0 приведенные напряжения, вызванные скреплением, в состоянии покоя ($p = 0$)

S' приведенные напряжения, вызванные только действием внутреннего давления p=4500 *кг/см²*, не принимая во внимание напряжений от скрепления

S'_{3000} приведенные напряжения, аналогичные S', но вызванные давлением $p = 3000$ *кг/см²*

S полные (суммарные) приведенные напряжения, обусловленные одновременным действием внутреннего давления $p = 4500$ *кг/см²* и скрепления

S_{3000} приведенные напряжения, аналогичные S, но отвечающие давлению $p = 3000$ *кг/см²*

и отношения диаметров $u_1 = 1{,}5$, $u_2 = u_3 = u_4 = 1{,}225$, рассчитаем величины приведенных напряжений и натяжений при скреплении согласно теории э.-ф., полагая, что величины рабочего и конструкционного давления газов остаются прежними, т. е. 3000 *кг/см²* и 4500 *кг/см²* соответственно. При давлении 4500 *кг/см²* приведенные напряжения на внутренних поверхностях всех слоев должны достигать одинакового значения σ. Тогда, согласно формуле (49), будем иметь

$$p = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(4 - \frac{1}{u_1^2} - \frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_3^2} - \frac{1}{u_4^2}\right)\sigma = 0{,}899\,\sigma,$$

откуда при $p = 4500$ *кг/см²* получим значение допускаемого напряжения

$$\sigma = 50{,}1 \text{ кг/мм}^2.$$

Таким образом, для материала со статическим пределом упругости $\sigma_E = 40$ *кг/мм²* оказывается $\sigma = 1{,}25\,\sigma_E$.

Но, как указывалось выше, расчет по теории э.-ф. и следует вести при повышенном значении допускаемого напряжения, ибо динамический предел текучести и динамический предел упругости ($\sigma_{0{,}01}$ и $\sigma_{0{,}03}$), имеющие значение в условиях быстро развивающихся напряжений при выстреле, заметно выше, чем соответствующие характеристики, получаемые

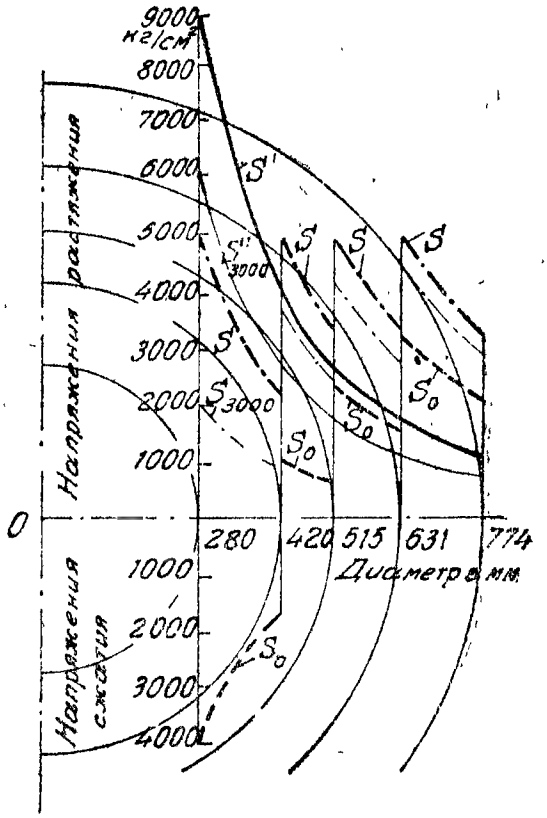


Рис. 15. Приведенные напряжения в стенке четырехслойного ствола 28-*см* калибра при расчете согласно теории э.-ф.

Обозначения одинаковы с обозначениями, разъясненными на рис. 14. Индекс g для упрощения опущен

в результате статического испытания на растяжение. При этом является целесообразным это превышение допускаемого напряжения по отношению к статическому пределу $\sigma_{0,03}$ принимать не свыше 25%.

Имея $\sigma = 50{,}1$ *кг мм*^{2}, при действии внутреннего давления $p = 4500$ *кг/см*^{2} получим на основании формул (49) следующие величины давлений между слоями:

$$p_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(3 - \frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_3^2} - \frac{1}{u_4^2}\right)\sigma = 2894 \text{ кг/см}^2,$$

$$p_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(2 - \frac{1}{u_3^2} - \frac{1}{u_4^2}\right)\sigma = 1930 \text{ кг/см}^2$$

$$p_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(1 - \frac{1}{u_4^2}\right)\sigma = 965 \text{ кг/см}^2.$$

Зная величины давлений, можно определить характер распределения полных приведенных напряжений в стенке ствола, если в формулу (44) подставить вместо u, d_a, p_i и p_a соответствующие численные значения для отдельных слоев. Так, например, формула (44) для I слоя будет иметь вид:

$$S_{g1} = \frac{\sqrt{3}}{u_1^2 - 1} \cdot \frac{d_{a1}^2}{d^2}\left(p - p_1\right).$$

Эпюры вычисленных таким способом, при $p = 4500$ *кг/см*^{2}, полных приведенных напряжений S' представлены на рис. 15.

Величины приведенных напряжений S_0, вызванных скреплением, а также полных приведенных напряжений S_{3000} для рабочего давления газов 3000 *кг/см*^{2} получатся таким же образом, как это было изложено при расчете ствола по теории наибольшей деформации.

Необходимые для скрепления ствола относительные производственные натяжения имеют следующие численные значения:

$$\theta_1 = 0{,}960\left(1-\frac{1}{u_1^2}\right)\frac{\sigma}{E} = \frac{5}{3}\frac{p-p_1}{E} = 1{,}275\cdot 10^{-3},$$

$$\theta_2 = \frac{5}{3}\frac{p_1-p_2}{E} + \frac{u_1^2-1}{u_1^2u_2^2-1}\theta_1 = 1{,}436\cdot 10^{-3},$$

$$\theta_3 = \frac{5}{3}\frac{p_2-p_3}{E} + \frac{u_1^2u_2^2-1}{u_1^2u_2^2u_3^2-1}\theta_2 = 1{,}605\cdot 10^{-3}.$$

Линейные величины производственных натяжений, следовательно, будут

$$\delta_1 = \theta_1 d_{a1} = 0{,}54 \text{ мм},$$
$$\delta_2 = \theta_2 d_{a2} = 0{,}74 \text{ „},$$
$$\delta_3 = \theta_3 d_{a3} = 1{,}01 \text{ „}.$$

Если назначить большие величины натяжений, то расчет приведенных напряжений следует вести согласно параграфу 4 (стр. 62). Но тогда должно быть обращено внимание на то, чтобы приведенные напряжения, вызванные скреплением, не превзошли статического предела упругости $\sigma_{0,03}$ также во внутреннем слое ствола (трубе). На этом основании и представляется также целесообразным применение стали с повышенным пределом текучести для изготовления внутреннего слоя ствола (трубы или ляйнера).

Е. Автофретаж

Предварительные напряжения в стенке орудийного ствола, имеющие назначением уменьшение напряжений, вызванных во внутреннем слое давлением газов при выстреле, могут быть созданы в однослойной трубе (моноблоке) посредством холодной пластической деформации. Для этого труба должна быть подвергнута действию внутреннего давления такой величины, при которой будет превзойден предел текучести металла на поверхности канала. Тогда внутренние слои трубы, напряженные выше указанного предела, получат остаточные деформации на растяжение. Напряженное состояние трубы в момент приложения внутреннего давления уже не будет соответствовать теории, относящейся к чисто упругим деформациям. Оно изменится таким образом, что

пластически деформированные внутренние слои будут обладать напряжениями, равными пределу текучести, в то время как в упруго деформированной зоне трубы напряжения несколько повысятся (см. рис. 16). При дальнейшем возрастании внутреннего давления пластически деформированная область расширяется, а напряжение на внутренней поверхности поднимается выше предела текучести (рис. 17). Ход процесса определяется характером зависимости между напряжениями и деформациями металла в пластической области, а также способностью последнего к упрочнению.

При разгрузке трубы от внутреннего давления, упругие напряжения, вызванные последним, исчезают, а остаточные деформации, полученные внутренними слоями трубы, сохраняются. В результате этого процесса, называемого автофретажем, происходит как бы непрерывное скрепление трубы бесконечно большим числом слоев, т. е. в стенке трубы после снятия давления возникают остаточные напряжения — сжимающие в зоне, прилегающей к поверхности канала, и растягивающие в периферийной зоне. Распределение напряжений в случае частичной пластической деформации стенки трубы показано на рис. 16. В случае же полной пластической деформации трубы на всю толщину стенки эпюра напряжений получит вид, показанный на рис. 17.

Таким образом, полученные остаточные напряжения будут оказывать действие, подобное тому, которое имеет место для многослойного скрепленного цилиндра. При этом предел упругого сопротивления трубы повысится и по величине будет близок к внутреннему давлению, вызвавшему остаточное расширение канала. До давлений, меньших давления автофретажа, примерно, на 15%, труба будет вести себя сразу же совершенно упруго. Если же подвергнуть ее повторному давлению автофретажа, то в стенке вновь возникают малые остаточные деформации, вызывающие небольшие изменения в величинах остаточных напряжений и способствующие тому, что при многократном приложении указанного давления предел упругого сопротивления трубы поднимается до величины последнего. Подобное же явление имеет место в случае стрельбы из орудийного ствола при столь высоком давлении газов, что оно вызывает остаточное расширение канала. По мере повторения выстрелов (при одном и том же давлении) это расширение не возрастает непрерывно, а вскоре достигает предела, который практически больше не повышается. Само собой разумеется, что при этом следует иметь в виду возможные колебания в величине давления газов и развитие процесса износа канала, а также влияние нагрева ствола. Из сказанного вытекает, что принятый на практике способ испытания

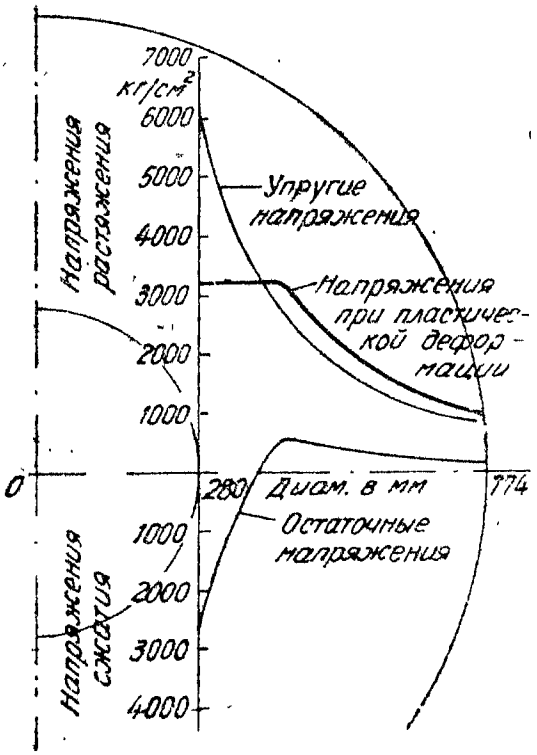


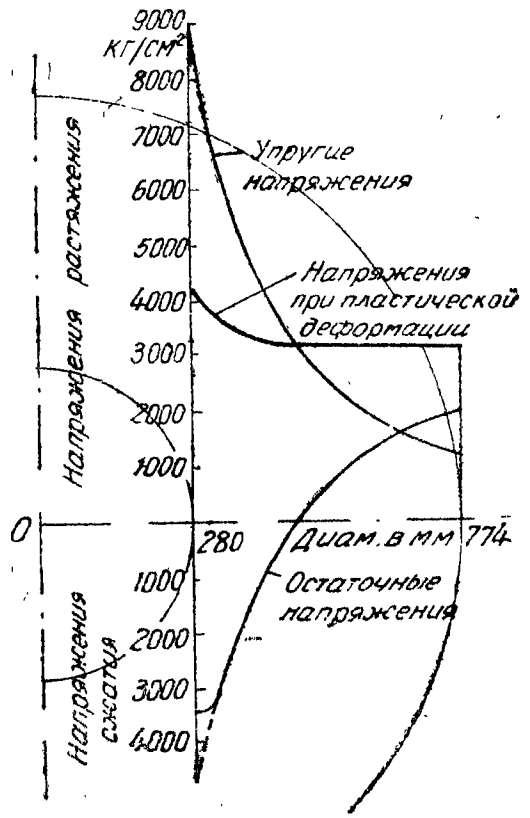
Рис. 16.

Рис. 16 и 17. Напряжения в стенке ствола при автофретаже

В процессе автофретажа пластически деформирована только внутренняя часть стенки, а наружная зона осталась в упругом состоянии. Остаточные напряжения, вызванные автофретажем, не превосходят предела упругости (на сжатие) металла стенки

стволов усиленным давлением является весьма целесообразным, так как если при этом произойдет остаточное расширение канала, не выходящее из границы допуска, то дальнейших остаточных деформаций, вызванных на службе орудия случайными давлениями, близкими к усиленному, опасаться в общем не приходится. Но нельзя все же не отметить, что вопрос о том, в какой мере созданные указанным способом остаточные напряжения являются устойчивыми во времени, требует дальнейшего изучения.

Создание остаточных напряжений в стенке трубы посредством холодной пластической деформации (автофретаж) практически осуществляется либо прогонкой через канал стальных пуансонов с постепенно увеличивающимися диаметрами, либо приложением внутреннего гидравлического давления. В большинстве случаев расширение канала производится до получения полной пластической деформации всей толщины стенки трубы, вплоть до наружной поверхности. Однако, это положение не следует рассматривать как обязательное условие, ибо является вполне достаточным, чтобы давление автофретажа превосходило значение конструкционного давления пороховых газов на соответствующую величину, причем в зависимости от размеров трубы и свойств металла указанное требование может быть удовлетворено в одних случаях при полной, а в других — при



При автофретаже пластически деформирована стенка на всю толщину. Остаточные напряжения, вызванные автофретажем, во внутреннем слое превзошли предел текучести на сжатие

Рис. 17.

частичной пластической деформации трубы. Но необходимо всегда учитывать, что при чистовой расточке и нарезке канала удаляется наиболее наклепанный внутренний слой трубы, вследствие чего полученные при автофретаже остаточные напряжения уменьшаются.

Если автофретируемая труба имеет неодинаковые размеры по наружным диаметрам, то при действии внутреннего давления участки трубы, обладающие более тонкой стенкой, будут расширяться в большей мере, чем участки, имеющие толстую стенку. Для устранения этой неравномерности расширения трубы, последняя при автофретаже вставляется в так называемый контейнер, являющийся своего рода матрицей. Размеры внутренней полости контейнера рассчитываются таким образом, чтобы расширение наружной поверхности трубы было равно заданной величине во всех сечениях ее.

Наряду с созданием остаточных напряжений в стенке трубы, т. е. с автофретажем в собственном смысле слова, в результате остаточного расширения трубы происходит повышение предела упругости и предела текучести стали вследствие упрочнения, причем наибольшее повышение этих характеристик имеет место во внутреннем, наиболее наклепанном слое.

Указанное повышение предела текучести стали служит дополнительным источником увеличения предела упругого сопротивления трубы, но оно всегда связано с заметным понижением вязкости материала. Это в особенности относится к обыкновенной углеродистой стали, которая, после сильной пластической деформации на холоду и последующего старения, наряду с заметным повышением предела текучести получает, как известно, значительное снижение ударной вязкости (хрупкость при старении, ср. стр. 188). Улучшенная хромоникелевая сталь оказывается в этом отношении менее чувствительной и для нее опасность получения хрупкости при наклепе и старении становится менее значительной. Поэтому, хромоникелевая сталь является наиболее пригодным материалом для автофретажа. В случае же применения углеродистой стали следует избегать больших степеней пластической деформации.

Величина давления автофретажа, необходимого для полной пластической деформации металла по всей толщине стенки трубы, а также возникающие при разгрузке остаточные напряжения, точному расчету не поддаются, так как соотношения, характеризующие поведение металла в области пластических деформаций, еще недостаточно изучены. Поэтому приходится прибегать к применению приближенных методов. Согласно опытам Клейна (Klein)[24] величина давления p_{fa}, доводящего пластически деформированную зону до наружной поверхности трубы, не соответствует полностью ни одному из значений, вычисленных по известным теориям прочности. Эта величина оказывается между значениями, вычисленными по теории энергии формоизменения и по теории наибольшего скалывающего напряжения, причем для мягкой стали она ближе к значению, вычисленному по последней теории. Вычисления производились по следующим формулам:

$$p_{fa} = \sigma_S \ln u \text{ — согласно теории наибольшего скалывающего напряжения} \tag{81}$$

или

$$p_{fa} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \ln u \text{—согласно теории энергии формоизменения.} \tag{82}$$

При помощи этих выражений и производится расчет приближенной величины давления, необходимого для автофретажа до достижения предела текучести на наружной поверхности трубы.

Остаточные напряжения в стенке автофретированной трубы могут быть приближенно определены путем вычита-

---

[24] См. сноску 11. О теории наибольшего скалывающего напряжения ср. *Лодэ* (*Lode*).

ния из напряжений, вызванных давлением автофретажа, напряжений, отвечающих чисто упругой деформации трубы при том же давлении [25].

---

[25] Если при действии давления автофретажа p_f, доводящего пластически деформированную зону до наружной поверхности трубы, принять, что в момент приложения этого давления происходит течение металла по всей толще стенки равномерно и при одинаковом значении предела текучести σ_S (т. е. пренебречь явлением упрочнения) и допустить, что осевая деформация равна 0 (см. сноску 22 на стр. 55), — то, согласно теории энергии формоизменения, напряжения текучести для любого слоя диаметра d будут иметь следующие величины:

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S \ln\frac{d}{d_a};\ \sigma_t = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S \ln\left(\frac{d}{d_a}+1\right);\ \sigma_l = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S \ln\left(\frac{d}{d_a}+0{,}5\right)$$

(см. *A. Nadai.* Der bildsame Zustand der Werkstoffe. Berlin, 1927. J. Springer. S. 135).

Отсюда следует, что внутреннее давление, вызывающее указанные напряжения, будет иметь величину

$$p_f = -\sigma_{ri} = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S \ln\frac{d_i}{d_a} = +\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S \ln u,$$

где

$$u = \frac{d_a}{d_i}.$$

Вычитая из приведенных выше напряжений σ_r, σ_t и σ_l чисто упругие напряжения, отвечающие давлению p_f и имеющие на основании формул (1), (2) и (41) вид

$$\sigma_r' = \frac{1}{u^2-1}\left[1-\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right]p_f = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S\frac{\ln u}{u^2-1}\left[1-\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right]$$

$$\sigma_t' = \frac{1}{u^2-1}\left[1+\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right]p_f = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S\frac{\ln u}{u^2-1}\left[1+\left(\frac{d_a}{d}\right)^2\right]$$

$$\sigma_l' = \frac{1}{u^2-1}p_f = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_S\frac{\ln u}{u^2-1},$$

получим формулы для напряжений, остающихся в стенке трубы после снятия давления автофретажа,

$$\sigma_{r0} = \sigma_r - \sigma_r';\ \sigma_{t0} = \sigma_t - \sigma_t';\ \sigma_{l0} = \sigma_l - \sigma_l'.$$

Эти формулы и служат для приближенного вычисления остаточных напряжений в стенке автофретированной трубы.

При использовании этих выражений следует иметь в виду, что они пригодны только для материала с выраженным пределом текучести, при котором пластическая деформация на внутренней поверхности трубы не превосходит предельной деформации, отвечающей пределу текучести. Если указанная предельная деформация окажется превзойденной, то произойдет упрочнение внутреннего слоя, а следовательно, и значительное повышение напряжения течения в этом слое, зависящее от характера кривой упрочнения для данного материала. Приведенные соображения

Вопрос о практическом определении этих остаточных напряжений в литературе освещен мало[26]. Результаты, полученные Клейном, не дали строгого соответствия ни с одной из теорий пластичности. Найденные им значения оказались меньше, чем это следовало из расчета по теории наибольшего скалывающего напряжения или теории энергии формоизменения.

При этом обнаружилось значительное влияние материала. Особого внимания заслуживает то обстоятельство, что остаточные напряжения не оставались неизменными во времени, а после длительного отдыха (старения) или после нагрева до температуры порядка 200° заметно снижались. Это наблюдение находится в соответствии с известным явлением значительного уменьшения остаточных напряжений в закаленной стали, а также в холоднотянутом материале, после длительного нагрева при 100°, — хотя последний не дает еще каких-либо структурных изменений. Наиболее значительное падение величины остаточных напряжений, созданных при автофретаже, имеет место для углеродистой стали. Так, например, для улучшенной углеродистой стали С45.61 Клейн нашел, что величина остаточного напряжения (растягивающего) в наружном слое трубы, подвергнутой автофретажу, равнялась в среднем 1900 *кг/см*^{2}. После шестимесячного отдыха трубы при комнатной температуре эта величина упала до 500—900 *кг/см*^{2}, т. е. понизилась более, чем в два раза. Напряжение сжатия во внутреннем слое трубы уменьшилось также на соответствующую величину. Улучшенная хромоникелевая сталь показала несколько меньшую чувствительность к влиянию старения: остаточные напряжения в автофретированной трубе из этой стали после искусственного старения (путем нагрева при 250° в течение часа) снизились, примерно, на $^1/_3$ — $^1/_2$ по сравнению с исходными значениями.

Имеющиеся до настоящего времени опытные данные еще не позволяют сделать окончательного заключения об автофретаже. Однако они ясно показывают, что созданные при этом процессе остаточные напряжения весьма заметно уменьшают свою величину после старения — естественного (отдыха) или искусственного (нагрев при 200° — 250°), — ко-

---

следует учитывать в отношении улучшенных сталей с сорбитной структурой, которые часто имеют слабо выраженный предел текучести.

Но в особенности важное значение имеет то обстоятельство, что надежному определению остаточных напряжений при автофретаже путем расчета препятствует сильное снижение их вследствие старения. Теоретический учет этого снижения не представляется возможным, так как до настоящего времени этот вопрос недостаточно исследован экспериментально.

[26] См. вышецитированные опыты *Клейна*. Для мягкой стали известны опыты *В. Крюгера* (*W. Krüger*, Z. VDI 53 (1909), S. 1399 и 1450.

торое является неизбежным в условиях службы трубы. При этом особенно чувствительной к старению оказывается углеродистая сталь. Этот факт следует иметь в виду при практическом осуществлении автофретажа. На основании изложенного, а также учитывая появление хрупкости, вызванной наклепом, следует признать наиболее пригодными для целей автофретажа улучшаемые легированные стали, мало чувствительные к влиянию старения. Наиболее целесообразно производить автофретаж таким образом, чтобы зона пластической деформации была доведена до наружной поверхности трубы. Необходимость этого обусловлена явлением снижения остаточных напряжений как вследствие удаления внутреннего слоя трубы при расточке и нарезании канала, так и в результате неизбежного влияния старения. Но вместе с тем следует указать на нежелательность деформирования трубы выше указанного предела, так как хотя при этом и происходит дальнейшее повышение предела текучести стали, но одновременно получает место весьма значительное падение вязкости, особенно сильно выраженное для углеродистой стали. Снижение же вязкости может оказать неблагоприятное влияние на службу металла ствола при стрельбе. Поэтому автор считает, что значительное повышение предела текучести за счет наклепа при автофретаже можно допускать лишь в отношении улучшаемых, очень вязких и мало чувствительных к старению сталей, т. е. сталей, содержащих никель.

Пределы применения автофретажа в отношении крупных калибров обусловливаются не только возможностями технического осуществления холодной пластической деформации, но также и соображениями металлургического порядка, требующими в случае изготовления длинных труб очень крупного калибра разделения поковки на несколько слоев.

Ж. Ляйнеры

Для восстановления изношенного ствола обычной конструкции (моноблока или скрепленного) производится рассверливание его канала с таким расчетом, чтобы в него можно было вставить с натяжением тонкостенную внутреннюю трубу с каморой и нарезной частью. На скрепление эта труба поступает в предварительно расточенном виде, а разделка каморы и нарезка канала производится после скрепления. Этот способ восстановления ствола при правильном его осуществлении дает безупречный результат, но является длительным и может быть реализован лишь на орудийном заводе, полностью оборудованном для производства стволов.

Быстрое восстановление ствола может быть произведено посредством сменяемого ляйнера, предусмотренного самой конструкцией ствола. Эта идея является довольно старой. Еще в 1890 г. подобным образом изготовлялись стволы полевых пушек в русской артиллерии *. Однако, общее внимание к этому вопросу было привлечено только в позднейшее время. В отношении быстро изнашивающихся стволов высокой мощности (зенитных), учитывая возможность работы в полевых условиях, смена ляйнера должна быть возможно более простой операцией, не требующей специального оборудования и осуществимой средствами подвижных мастерских. Удовлетворение этих требований в применении к зенитным орудиям считается необходимым во Франции, Италии и в других странах. Поэтому представляется желательным, чтобы ляйнеры для стволов одного и того же образца указанного вида артиллерии были по возможности взаимозаменяемы.

Конструкция ляйнера, безусловно, должна давать полную гарантию от возможности проворота его при выстреле и от продольного смещения.

Применяются два способа устройства ляйнеров: 1) ляйнеры, вставляемые с натяжением и имеющие коническую наружную поверхность по всей длине, и 2) ляйнеры, вставляемые с радиальным зазором, т. е. свободные ляйнеры.

1. Конический скрепленный ляйнер

Примером первого способа устройства может служить ляйнер английской морской пушки, показанной на рис. 3. Этот же способ находит применение в американской артиллерии. Наружная поверхность ляйнера изготовляется в виде конуса с падением диаметра от 2 до 5 *мм* на 1000 *мм* длины. Ляйнер вставляется в ствол либо путем запрессовывания в холодном состоянии, либо посредством горячего скрепления с натяжением, примерно, в 0,001 от диаметра. Величина натяжения определяется тем условием, чтобы трение, вызванное скреплением, надежно препятствовало смещению ляйнера вперед при выстреле. Это условие является в данном случае особенно важным, так как коническая наружная поверхность может вызвать сужение канала. Последнее явление наблюдалось в старых английских стволах. С целью лучшего обеспечения от продольного смещения, ляйнеры снабжаются заплечиками и, кроме

---

* В курсе *Потоцкого* „Артиллерийские орудия и снаряды" (1887 г. стр. 185) имеется указание, что вставление тонкостенных внутренних труб с зазором (т. е. по существу свободных ляйнеров) применялось на Обуховском заводе уже для полевых пушек обр. 1870 г. (*Прим. ред.*)

того, в Англии применяется надевание упорных колец из высококачественной стали. Ряд заплечиков можно видеть на ляйнере, показанном на рис. 3. В новейших американских стволах, для получения равномерного прилегания при скреплении, устраивается только один заплечик в казенной части. Для извлечения изношенного ляйнера этого типа затворное кольцо удаляется, ляйнер закрывается с обоих концов таким образом, чтобы можно было произвести прогонку через него сильного потока воды и затем весь ствол нагревается до 450° [27]. После нагрева ствол вынимается из печи, устанавливается на плиту дулом вниз и через канал ляйнера прогоняется вода. Как только наступает прекращение сильного парообразования в прогоняемой воде, ствол при помощи крюка, укрепленного в замке ляйнера, приподнимается, примерно, на 10 *см*. Через небольшой промежуток времени, порядка 1—2 мин. оболочка ствола под действием собственного веса спадает, с ляйнера и последний посредством крана свободно из нее извлекается. При вставлении нового ляйнера обычным в США способом горячего скрепления, концы ляйнера также снабжаются замками, позволяющими пропускать через него проточную воду для охлаждения. Оболочка подвергается нагреванию в вертикальной печи так, чтобы температура казенной части составляла ок. 230°, а дульной части ок. 300°. Затем производится вставление ляйнера в оболочку, причем ляйнер непрерывно охлаждается посредством пропускания воды до тех пор, пока не произойдет плотная посадка заплечика на место, после чего ляйнер удерживается в этом положении при помощи значительного давления (ок. 200 *m*). Тогда дальнейшее охлаждение ляйнера ведется ступенчатым способом, путем понижения уровня воды от казны к дулу, так что плотное прилегание оболочки происходит сначала в казенной части, а затем постепенно распространяется к дулу. Таким способом охлаждения можно достигнуть надежного скрепления и свести к минимуму осевые напряжения, обусловленные скреплением.

В Англии скрепление конических ляйнеров производится не горячим способом, а посредством загонки ляйнера в оболочку при комнатной температуре ударами молота или под прессом. Если величина натяжения и наклон производящей конической поверхности ляйнера выбраны согласно вышеприведенным указаниям, то при свободном вставлении ляйнера в холодную оболочку остается еще 10—20 *см* до конечного положения. Тогда посредством 5-тонного молота производится несколько ударов по концевой пробке, вставленной в ляйнер со стороны казенной части, в результате

[27] Army Ordnance, Washington 1927, v. VIII, p. 156.

чего ляйнер вгоняется до упора заплечика. Вследствие коничности ляйнера этим путем достигается такой же эффект скрепления, как и при горячем способе. Но при холодном способе удается избежать одной из трудностей горячего скрепления, обусловленной разницей в длине холодного ляйнера и нагретой оболочки. Эта разница при натяжении в 0,001 для трубы длиной в 20 *м* (40-*см* морская пушка длиной 50 калибров) составляет 20 *мм*, и ее наличие затрудняет надежное прилегание заплечика, для обеспечения которого становится необходимым применение описанного выше, специального способа охлаждения. Согласно английским данным, повреждения движущихся конических поверхностей при запрессовании ляйнера в оболочку не происходит.

2. Свободный ляйнер

Конические ляйнеры, вставляемые с натяжением холодным или горячим способом, вполне удовлетворяют своему служебному назначению, но изготовление их является сложным и дорогостоящим делом, а скрепление и раскрепление ляйнеров подобного типа требует наличия особых печей и другого заводского оборудования. В случае применения скрепляемых ляйнеров для орудий, работающих в полевой обстановке (зенитные пушки, полевые пушки и т. п.), возможность восстановления стволов на позиции или даже в полевых подвижных мастерских исключается. Это требование удовлетворяется другим способом — применением так называемых свободных ляйнеров, т. е. ляйнеров с радиальным зазором, вставление и вынимание которых чрезвычайно упрощено. Согласно последним сведениям русских источников, подобные ляйнеры с успехом применялись в русской 6″ морской пушке уже в 1900 году.

Идея устройства свободного ляйнера заключается в следующем: ляйнер, надлежащим образом обеспеченный от продольного смещения и от проворота, на значительном протяжении по длине имеет небольшой радиальный зазор по отношению к оболочке (или внутренней трубе). Следовательно, он свободно входит в последнюю почти по всей своей длине, за исключением короткой части, предназначенной для закрепления ляйнера. При выстреле ляйнер расширяется свободно до тех пор, пока деформация его наружной поверхности станет равной зазору; в этот момент происходит плотное прилегание ляйнера к оболочке, а при дальнейшем возрастании давления газов в сопротивлении участвует вся толщина стенки ствола, состоящей из стенок ляйнера и оболочки. Для уменьшения напряжений в стенке ляйнера величина зазора должна быть возможно меньше. Большой

зазор может привести к остаточному расширению ляйнера при выстреле. С другой стороны, величина зазора должна обеспечивать беспрепятственное вынимание ляйнера, даже в случае значительной длины его. Для облегчения вынимания ляйнера, имеющего очень малый зазор, нередко наружная поверхность ляйнера делается конической, но с весьма небольшим наклоном производящей. В стволах французской артиллерии (Шнейдера) величина зазора составляет 0,001 диаметра, а стенка ляйнера имеет толщину в 0,1 калибра[28]. На рис. 18 и 19 показан ляйнер этого типа

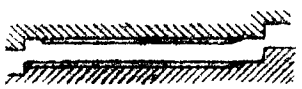


Рис. 19

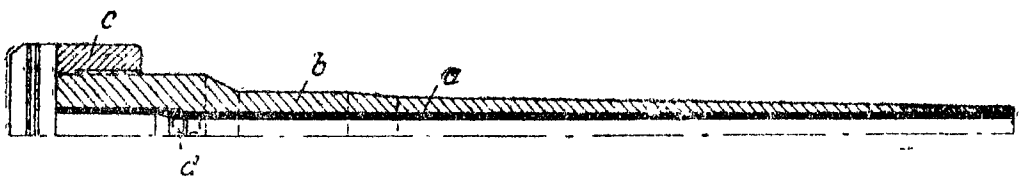


Рис. 18 и 19. Ствол американской 105-*мм* зенитной пушки со свободным ляйнером (по Mc Farland'y)

a свободный ляйнер

b оболочка

c навинтной казенник

d шпоночное устройство, обеспечивающее от поворота ляйнера. На рис. 19 см. детальную схему этого устройства, показанного в раздвинутом положении

для американской зенитной пушки. Имеющееся в этом стволе, предохранительное от поворота ляйнера, устройство возбуждает сомнение в отношении возникновения дополнительных напряжений, вызванных надрезом. Свободные ляйнеры применяются также во Франции, Италии и других странах.

3. Определение приведенных напряжений в стенке свободного ляйнера

Обозначим через

d_{i1} и d_{a1} диаметры ляйнера (I слоя) в *мм*,

d_{i2} и d_{a2} „ оболочки (II слоя) „

η — диаметральный зазор в *мм*.

$$u_1 = \frac{d_{a1}}{d_{i1}}; \quad u_2 = \frac{d_{a2}}{d_{i2}}; \quad u_R = u_1 u_2 = \frac{d_{a2}}{d_{i1}},$$

[28] Для русских стволов указывается еще меньшая величина зазора. Так, например, для 6″ пушки величина зазора должна составлять всего лишь 0,05 *мм*. Но надежное получение столь малого зазора при производстве длинных труб кажется невероятным, так как он лишь незначительно превышает предел допуска первого класса точности для этого диаметра. (Соображения автора правильны, но сообщаемый факт не соответствует действительности. *Прим. ред.*).

где в отношении u_R влиянием малой разности диаметров можно пренебречь.

Для прилегания ляйнера к оболочке необходимо, чтобы он получил расширение по наружному диаметру на η *мм*, т. е. произошла тангенциальная деформация наружной поверхности $\varepsilon_a = \frac{\eta}{d_{a1}}$. Требующееся для этого внутреннее давление p_0 при условии $\sigma_l = 0$ будет

$$p_0 = \frac{u_1^2 - 1}{2} \cdot E \cdot \frac{\eta}{d_{a1}}. \tag{83}$$

При принятии во внимание осевого растягивающего усилия, которое входит в расчет по теории э.-ф., формула получит вид:

$$p_0 = \frac{3}{5}(u_1^2 - 1) \cdot E \cdot \frac{\eta}{d_{a1}} \tag{84}$$

[согласно второй формуле системы (50), положив $p_a = 0$. — *Прим. ред.*].

До достижения этого давления p_0 напряжения будут иметь место только в ляйнере. При дальнейшем повышении давления до величины p *кг/см*^{2} приращение давления $(p - p_0)$ будет действовать на ствол, как на однослойную трубу, имеющую отношение диаметров u_R. Тогда в элементарном слое диаметра d, согласно теории э.-ф. (принимая те же упрощения, которые были сделаны при расчете многослойного ствола), будем иметь следующие приведенные напряжения: при давлении p_0 — только в стенке ляйнера

$$S_{g1p_0} = \sqrt{3}\,\frac{1}{u_1^2 - 1}\left(\frac{d_{a1}}{d}\right)^2 p_0,$$

при возрастании давления до p — в общей стенке ляйнера и оболочки

$$S_{g(p-p_0)} = \sqrt{3}\,\frac{1}{u_R^2 - 1}\left(\frac{d_{a2}}{d}\right)^2 (p - p_0).$$

Следовательно, полное приведенное напряжение, вызванное давлением p в стенке ляйнера, выразится формулой:

$$S_{g1} = S_{g1p_0} + S_{g(p-p_0)} = \sqrt{3} \cdot \left(\frac{d_{a1}}{d}\right)^2 \left[\frac{u_2^2 - 1}{(u_1^2 - 1)(u_R^2 - 1)} p_0 + \frac{u_2^2}{u_R^2 - 1} p\right], \tag{85}$$

а в стенке оболочки:

$$S_{g2} = \sqrt{3}\left(\frac{d_{a2}}{d}\right)^2 \frac{1}{u_R^2 - 1}(p - p_0). \tag{86}$$

Максимальные значения этого напряжения будут на внутренних поверхностях: ляйнера

$$S_{\sigma i1} = \sqrt{3}\,\frac{u_1^2(u_2^2 - 1)}{(u_1^2 - 1)(u_R^2 - 1)} p_0 + \sqrt{3}\,\frac{u_R^2}{u_R^2 - 1} p,$$

оболочки

$$S_{gi2} = \sqrt{3}\,\frac{u_2^2}{u_R^2 - 1}(p - p_0).$$

Подставляя в два последних выражения значение p_0 из (84) получим:

$$S_{gi1} = \sqrt{3}\,\frac{u_R^2}{u_R^2 - 1} p + \frac{3}{5}\sqrt{3}\,\frac{u_R^2 - u_1^2}{u_R^2 - 1} E \frac{\eta}{d_{a1}} \tag{87}$$

$$S_{gi2} = \sqrt{3}\,\frac{u_2^2}{u_R^2 - 1} - \frac{3}{5}\sqrt{3}\,\frac{u_R^2 - u_2^2}{u_R^2 - 1} E \frac{\eta}{d_{a1}} \tag{88}$$

Таким образом приведенные напряжения оказываются для ляйнера выше, а для оболочки ниже, чем для однослойной трубы с отношением диаметров u_R (см. формулу 45), на величину второго члена.

Это добавочное напряжение для ляйнера возрастает пропорционально величине зазора η и несколько уменьшается с увеличением толщины стенки ляйнера при данной общей толщине стенки ствола, так как оно пропорционально разности $u_R^2 - u_1^2$.

Следовательно, чрезвычайно важно иметь зазор возможно малой величины. Так как влияние толщины стенки ляйнера сказывается меньше, чем величина зазора, то эта толщина назначается в соответствии с требованиями веса, удобства изготовления и перевозки.

В таблице 7 дано сопоставление величин максимальных приведенных напряжений на внутренних поверхностях ляйнера и оболочки на основании расчета по теории э.-ф. ствола, имеющего диаметры $d_{i1} = 100$ *мм*, $d_{a2} = 320$ *мм*, т. е. $u_R = 3{,}2$, с ляйнером, имеющим толщину стенки 10 и 15 *мм* вставленным с относительным зазором $\frac{\eta}{d_{a1}} = 0{,}001$ и 0,002, так что линейные величины диаметрального зазора составят 0,12 *мм* и 0,24 *мм* при толщине стенки ляйнера в 10 *мм*, 0,13 *мм* и 0,26 *мм* при толщине стенки в 15 *мм*.

Таблица 7. Максимальные приведенные напряжения в свободном ляйнере (S_{gi1}) и в оболочке (S_{gi2}) на основании расчета по теории э.-ф.

При толщине стенки ляйнера 10 *мм*

$u_1 = 1{,}2$; $u_2 = 2{,}67$; $u_R = 3{,}2$

Величина зазора	Давление газов *кг/см²*	2700	3500	4000
$\eta = 0{,}001\ d_{a1}$	S_{gi1} *кг/мм²*	72,6	88,0	97,6
$= 0{,}12$ *мм*	S_{gi2} »	28,6	39,3	46,0
$\eta = 0{,}002\ d_{a1}$	S_{gi1} »	94,4	109,8	119,4
$= 0{,}24$ *мм*	S_{gi2} »	21,2	31,8	38,5

При толщине стенки ляйнера 15 *мм*

$u_1 = 1{,}3$; $u_2 = 2{,}46$; $u_R = 3{,}2$

Величина зазора	Давление газов *кг/см²*	2700	3500	4000
$\eta = 0{,}001\ d_{a1}$	S_{gi1} *кг/см²*	72,0	87,4	97,0
$= 0{,}13$ *мм*	S_{gi2} »	20,8	29,9	35,6
$\eta = 0{,}002\ d_{a1}$	S_{gi1} »	92,2	107,6	117,2
$= 0{,}26$ *мм*	S_{gi2} »	10,9	20,0	25,7

Эпюры рис. 20 дают наглядное представление о величинах и распределении приведенных напряжений в стенке ствола для случая ляйнера с толщиной стенки в 15 *мм*.

Таким образом, приведенное напряжение на внутренней поверхности ляйнера (при расчете по теории э.-ф.) при зазоре в $0{,}1\%$, в круглых числах, на 21 *кг/мм²*, а при зазоре в $0{,}2\%$ — на 42 *кг/мм²* выше приведенного напряжения, возникающего на внутренней поверхности однослойного ствола (нескрепленного), имеющего равную толщину стенки.

Следовательно, для изготовления свободного ляйнера требуется сталь с соответственно повышенным пределом текучести. Величина предела текучести должна быть такова, чтобы возможность заметной пластической деформации ляйнера была исключена, так как получение последней приводит к уменьшению зазора, а следовательно, и к затруднениям при вынимании ляйнера. Поэтому при расчете по теории э.-ф. величину предела текучести следует назначать равной по меньшей мере $^5/_6$ максимального приведенного

напряжения, отвечающего конструкционному давлению газов, если основанием для определения этого давления служит крешерный способ. Таким образом, в численном примере, приведенном в таблице 7, при конструкционном давлении газов, равном 4000 *кг/см²*, для ляйнера требуется сталь с пределом текучести 81 *кг/мм²* при зазоре в 0,13 *мм* и 98 *кг/мм²* при зазоре в 0,26 *мм*. Столь значительное влияние величины зазора показывает, что допуски при обработке свободного ляйнера должны находиться в весьма узких пре-

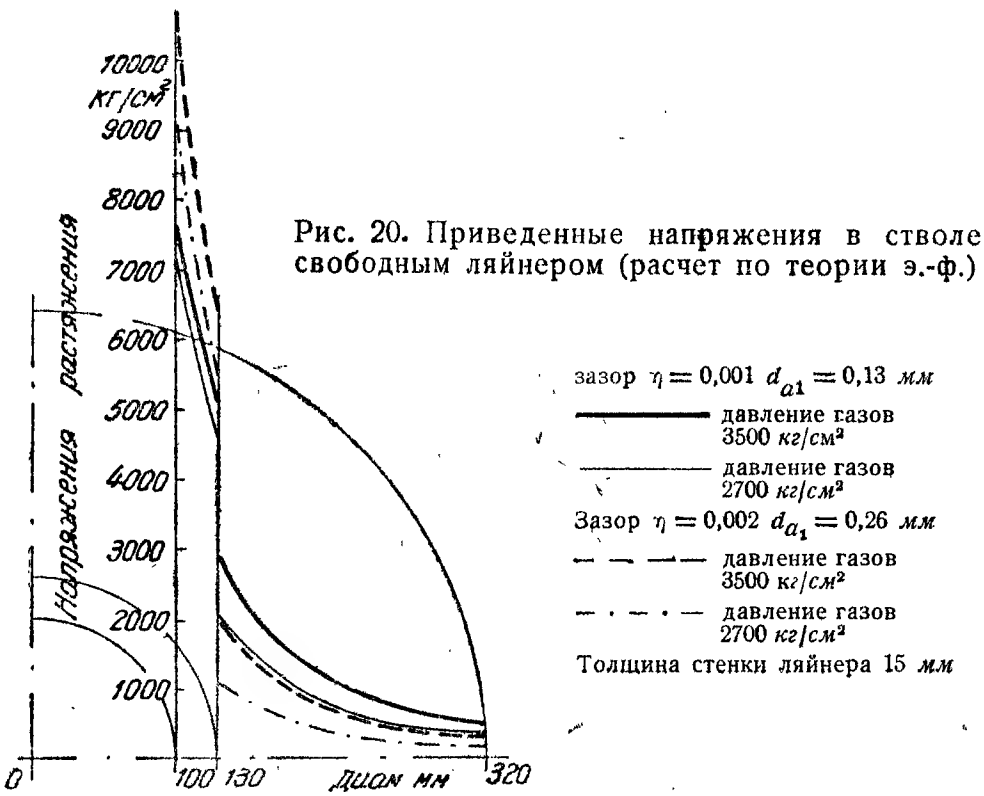


Рис. 20. Приведенные напряжения в стволе со свободным ляйнером (расчет по теории э.-ф.)

делах. Предельный допуск по первому классу точности согласно DIN 777 равен $^1/_{200}\sqrt[3]{d_{a1}}$, что в данном случае составит ± 0,025 *мм*; предельный допуск по второму классу точности ± 0,038 *мм*. Соответствующая разность величин приведенного напряжения будет равна от ± 4,5 до ± 6,8 *кг/мм²* при толщине стенки ляйнера 10 *мм* и от ± 3,9 до ± 5,9 *кг/мм²* при толщине — 15 *мм*.

Применение автофретажа для получения желаемого распределения напряжений в таком тонкостенном объекте, как ляйнер, может дать лишь небольшой эффект, который едва ли сможет оправдать соответствующее увеличение стоимости, тем более, если учесть при этом частичное снятие созданных автофретажем напряжений при чистовой расточке и обточке заготовки ляйнера, нарезании канала, а в особенности вследствие неизбежного влияния старения. Правда, путем соответствующей пластической деформации при авто-

фретаже может быть достигнуто значительное повышение предела текучести. Но при этом необходимо учитывать заметное падение вязкости материала, а самое главное — установить опытным путем влияние наклепа на стойкость применяемых марок стали против износа. Поэтому, в первую очередь, надо стремиться к достижению требуемого высокого предела текучести за счет целесообразного легирования стали и надлежащей термической обработки ляйнера, а не путем наклепа.

Для изготовления оболочки требуется материал со значительно меньшим пределом текучести, т. е. того же порядка, как и для обычных скрепленных стволов. Подобный материал с пределом текучести от 36 до 40 *кг/мм*^{2} (при конструкционном давлении газов ок. 4000 *кг/см*^{2} в случае ляйнера с толщиной стенки 15 *мм*) и высокими свойствами вязкости может быть получен без затруднений. Поэтому применение автофретажа или обычного метода скрепления для изготовления оболочки не требуется, и какого-либо влияния на величины напряжений в стенке ляйнера оно оказать не может. Необходимость устройства оболочки в виде конструкции, скрепленной цилиндрами, может возникнуть лишь в том случае, если величину поковки по каким-либо другим соображениям (в особенности по соображениям металлургического порядка) представляется желательным разделить на несколько отдельных слоев.

4. Приведенные напряжения в стенке конического ляйнера, вставленного с натяжением

Распределение напряжений в стенке скрепленного конического ляйнера существенно отличается от случая свободного ляйнера. Оно будет совершенно таким же, как и в стенке внутренней трубы ствола, скрепленного цилиндрами, и расчет этих напряжений производится так же, как при обычном скреплении. Следовательно, понижение напряжений в стенке ляйнера может быть достигнуто посредством надлежащего выбора величин натяжений. На рис. 21 представлена эпюра приведенных напряжений в стенке ствола, имеющего те же размеры, что и в случае, показанном на рис. 20, но с коническим ляйнером, вставленным с натяжением (холодным или горячим способом), причем оболочка состоит из двух слоев; конструкционное давление газов равно 3500 *кг/см*^{2}. Таким образом, в данном случае, в целях получения желаемого распределения напряжений оказалось целесообразным устройство оболочки в виде двухслойной, скрепленной конструкции, подобно тому, как в указанном выше английском стволе применено скрепление проволокой. Следовательно, для изготовления скрепленных

ляйнеров вполне применимы те же стали, что и для обычных скрепленных стволов. Допускаемое напряжение для стали можно назначать равным 1,2 σ_E при расчете по теории э.-ф. и σ_E при расчете по теории наибольшей деформации, где σ_E есть условный статический предел упругости $\sigma_{0,01}$ или $\sigma_{0,03}$ (равный примерно 0,9 σ_S). Однако, несмотря на это, в интересах повышения стойкости против износа рекомендуется для изготовления ляйнеров применять более высококачественную сталь. Таким образом, в отношении распределения напряжений, применение скрепленных ляйнеров является более выгодным, чем применение свободных ляйнеров. Но решающее значение при выборе того или дру-

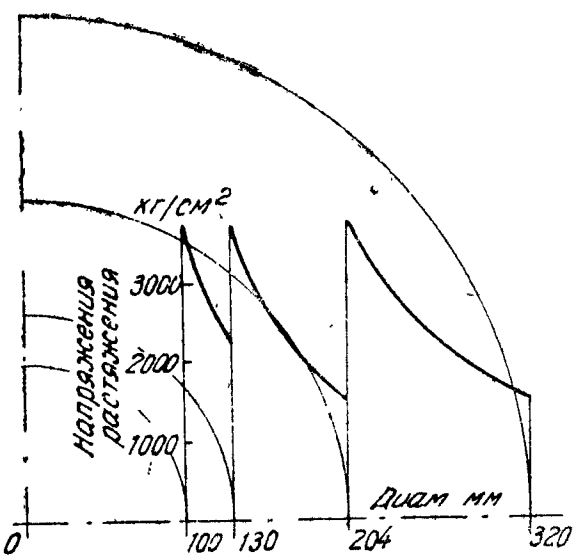


Рис. 21. Приведенные напряжения в стенке ствола, состоящего из конического ляйнера, вставленного с натяжением, и двухслойной скрепленной оболочки (по теории э.-ф.). Толщина стенки ляйнера 15 *мм*; давление газов 3500 *кг/см²*

гого способа в каждом частном случае имеют соображения о степени необходимости возможно простой замены ляйнера, а также требования к механическим свойствам стали для ляйнера, повышение которых с увеличением калибра становится все более и более затруднительным.

3. Теоретическое исследование прочности орудийного ствола и его проектирование

Прежде всего должна быть определена кривая давления газов. Если она неизвестна из опыта, то ее следует рассчитать при помощи из существующих приближенных методов [29]. Очень простым и для проектирования стволов вполне достаточным является способ Валлье-Гейденрейха [30].

---

[29] Подробности см. в труде *C. Cranz.* Lehrbuch der Ballistik. Bd. 2, Springer: Berlin, 1926.

[30] См. *W. Heydenreich.* Lehre vom Schuss. Bd. II, S. 57. Mittler u. Sohn: Berlin, 1908.

Максимальное давление газов принимается:

$p_{max} = 2000 - 2600$ *кг/см²* для полевых пушек,
$= 2500 - 3000$ „ „ тяжелых осадных орудий,
$= 3100 - 3600$ „ „ пушек максимальной мощности,
$= 3100 - 3600$ „ „ винтовок.

Для определения среднего давления газов $p_{ср}$ служит формула:

$$p_{ср} = (1 + \xi) \frac{G \cdot v_0^2}{2gfs},$$

где обозначены:

через G — вес снаряда в *кг*,
g — ускорение силы тяжести $= 9{,}81$ *м/сек²*,
v_0 — начальная скорость снаряда в *м/сек*,
f — площадь поперечного сечения канала, учитывая нарезы, в *см²*,
s — путь снаряда в канале до вылета из дула в *м*,
ξ — коэфициент, введенный для учета потерь на трение, ускорение заряда и т. д.,
$\xi = 0{,}10$ для полевых пушек, гаубиц и т. д.
$0{,}11 - 0{,}12$ для тяжелых осадных орудий,
$0{,}04$ до $0{,}06 + {}^1/_3 \frac{L}{G}$ для пушек максимальной мощности (морских, зенитных и т. п.) и для винтовок; L — вес заряда в *кг*.

Зная отношение давлений $\frac{p_{ср}}{p_{max}} = \eta$, из таблицы 8 (по Гейденрейху) находим путь снаряда s_p до места наибольшего давления газов в метрах.

$$s_p = s\,\Sigma(\eta).$$

Из отношения

$$\lambda = \frac{x}{s_p},$$

где x путь снаряда в метрах, отвечающий давлению p_x, определяем величину последнего $p_x = p_{max}\psi(\lambda)$ *кг/см²*. Значения $\varphi(\lambda)$ даны в таблице 9.

При помощи формул, приведенных на стр. 45—53, зная размеры ствола и механические свойства материала, для любого ствола можно определить величину конструкционного давления в каждом поперечном сечении. При определении допускаемого напряжения следует учесть соображения, изложенные на стр. 43—44. Отношение рассчитанного

Таблица 8
(по Гейденрейху)

η	$\Sigma(\eta)$
0,00	0,0000
0,05	0046
0,10	0104
0,15	0177
0,20	0,0262
0,25	0360
0,30	0471
0,35	0597
0,40	0740
0,45	0903
0,50	0,1090
0,55	1132
0,60	1160
0,65	1192
0,70	1231
0,75	0,283

Таблица 9 (по Гейденрейху)

λ	$\psi(\lambda)$	λ	$\psi(\lambda)$
0,25	0,690	10	0,214
0,50	890	11	195
0,75	970	12	179
1,00	1,000	13	166
1,25	0,966	14	154
1,50	893	15	0,144
1,75	828	16	135
2,00	0,769	17	127
2,5	668	18	120
3,0	590	19	114
3,5	527	20	0,108
4,0	475	25	086
4,5	433	30	071
5,0	0,397	35	060
6	340	40	052
7	297	45	046
8	263	50	0,041
9	236	75	027
10	0,214	100	0,020

таким образом конструкционного давления газов к рабочему давлению газов дает величину запаса прочности для любого сечения ствола, причем следует иметь в виду, что вся камора и участок канала от начала нарезной части до места максимального давления газов находятся под действием последнего. Величина запаса прочности в дульной части всегда оказывается значительно более высокой, чем на остальном протяжении ствола, так как толщина стенки в этой части увеличивается против расчетной величины, в целях обеспечения необходимой продольной жесткости,

усиления безопасности при разрыве и т. д. Для наиболее важных сечений ствола, а именно: в каморе, в месте наибольшего давления газов и в местах перехода к меньшему числу слоев — рекомендуется особенно подробное исследование величин и распределения напряжений, учитывая значения натяжений при скреплении согласно способам, изложенным на стр. 59—63.

При проектировании нового ствола необходимо прежде всего решить, должен ли он быть изготовлен в виде моноблока или в виде конструкции, скрепленной цилиндрами, и должен ли он быть снабжен скрепленным или свободным ляйнером. При выборе между моноблоком и скрепленным стволом следует учитывать не только величину давления газов, но и соображения, относящиеся к механической обработке и металлургическим процессам.

Стволы малого калибра допустимо изготовлять в виде моноблоков, даже в случае высокого давления газов. Автофретаж позволяет осуществить создание искусственных напряжений в стенке, а следовательно и повышение предела упругого сопротивления ствола, но в отношении его применения следует иметь в виду соображения, изложенные на стр. 76—77. Для изготовления обыкновенного, свободного от предварительных напряжений, однослойного ствола с толщиной стенки, равной одному калибру, в случае конструкционного давления газов в 3500 *кг/см*^{2} требуется сталь с пределом текучести $\sigma_S = 50 - 55$ *кг/мм*^{2}, который при конструкционном давлении в 4000 *кг/см*^{2} повышается до 57—63 *кг/мм*^{2}. Ствол, удовлетворяющий этим требованиям в отношении предела текучести и обладающий вместе с тем безупречной, равномерной вязкостью и хорошо прокованный, может быть изготовлен в виде одной поковки для орудий, вплоть до полевой пушки нормального калибра. В целях обеспечения равномерной проковываемости является удобным,— как это и имеет место для современной американской зенитной пушки (рис. 18),— раздельное изготовление и ковка казенника и собственно ствола, соединение которых производится затем путем навинчивания с натяжением. Подобное раздельное устройство применялось уже во время мировой войны в стволе английской полевой пушки.

В случае применения свободного ляйнера, для его изготовления потребуется, как указывалось выше, сталь со значительно более высоким пределом текучести—от 80 до 100 *кг/мм*^{2}, в зависимости от величины зазора (стр. 84).

Изготовление длинного ствола крупного калибра из одной поковки, металл которой обладал бы очень высоким пределом текучести наряду с безукоризненной вязкостью, при поперечном сечении каморы, значительно превосходящем

сечение дульной части, является делом недостаточно надежным. Трудности возрастают с увеличением калибра и длины ствола. Поэтому, при изготовлении стволов крупного калибра, приходится прибегать к методу скрепления цилиндрами, который позволяет осуществить разделение стенки на ряд отдельных элементов, получающих лучшую и равномерную проковку и, кроме того, допускающих применение материала с не столь высоким пределом текучести. Сказанное полностью относится и к стволам высокой мощности, характеризующимся высоким давлением газов.

Наименьшее допустимое значение предела текучести стали стволов, спроектированных по принципу максимального сопротивления, при конструкционном давлении газов в 4000 *кг/см*^{2} будет равно ок. 60 *кг/мм*^{2} в случае одного слоя, ок. 45 *кг/мм*^{2} для двухслойной конструкции, ок. 38 *кг/мм*^{2}— для трехслойной и ок. 35 *кг/мм*^{2}—для четырехслойной. Наибольшим числом слоев, не превосходящим, однако, четырех даже для стволов высокой мощности, скрепляется только камора и часть канала до того места, где, согласно кривой давления газов, необходимый запас прочности обеспечивается при числе слоев, уменьшенном на единицу. Таким же образом производится постепенное уменьшение числа слоев по направлению к дулу. Во избежание получения резкого скачка напряжений в месте перехода от большего числа слоев к меньшему, заканчивающийся наружный слой должен иметь постепенно уменьшающуюся толщину стенки. Длина скрепленного ляйнера всегда должна быть равна длине ствола (оболочки). Связь между отдельными слоями скрепленного ствола должна быть такова, чтобы возможность взаимного смещения или проворота их была исключена. Соблюдение этого условия обеспечивается в первую очередь наличием давлений, вызванных скреплением; для этого натяжения должны иметь надлежащие высокие значения. Кроме того, всегда предусматриваются и специальные методы крепления в виде нарезки, штыкового соединения, шпоночных колец и заплечиков, прилегающих друг к другу. Примеры этих соединений можно видеть на рис. 1 и 2. Как клиновой, так и поршневой затвор всегда укрепляется в оболочке, причем казенник или составляет одно целое с последней, или навинчивается на нее с натяжением.

Для осуществления безупречного скрепления стволов крупного калибра требуется продолжительный производственный опыт. Нагрев скрепляющих элементов производится в газовой или электрической печи до такой степени, чтобы получить расширение внутреннего диаметра надеваемого цилиндра, в 2—3 раза превышающее величину натяжения, с целью обеспечения достаточного зазора при надевании. Для этого, в зависимости от величины натяжения требуется

температура нагрева от 250° до 450°. Нагрева до более высокой температуры и, в частности, окисления поверхностей скрепляемых элементов необходимо избегать. Надеваемый цилиндр (или кольцо) надвигается на установленный в вертикальном положении скрепляемый элемент, подвергающийся извнутри охлаждению водой до плотной посадки на место упорного заплечика, т. е. до занятия цилиндром окончательного положения. Для обеспечения плотного прилегания заплечика на французских заводах практикуется приложение к надеваемому цилиндру значительного продольного усилия, действующего в течение всего периода охлаждения. При этом важное значение имеет способ охлаждения, который в США осуществляется таким образом, что сначала охлаждается водяными брызгами (из трубчатого кольца с отверстиями) только часть цилиндра, прилегающая к упорному заплечику до тех пор, пока произойдет плотное прилегание в этом месте. Затем, по мере дальнейшего охлаждения (путем последовательного пуска воды из последующих колец, охватывающих скрепляющий цилиндр), происходит постепенное прилегание скрепляемых элементов на остальном протяжении [31]. Если же упорный заплечик устроен близ дульного конца скрепляющего цилиндр, то внутренний скрепляемый элемент вставляется в предварительно нагретый и соответствующим образом установленный наружный элемент опять-таки до упора и прилегания указанного заплечика. При скреплении кольцами, снабженными нарезкой (перекрывающие нарезные кольца и т. д.), навинчивание нагретого кольца должно быть закончено до его охлаждения.

И. Устройство ствола

Для полного завершения раздела об устройстве ствола необходимо еще остановиться на рассмотрении вопросов, относящихся к его длине, нарезке, устройству каморы и казенника. Ниже приводимые цифровые данные выведены из общих конструктивных соображений с учетом имеющихся литературных сведений об орудийных конструкциях различных государств.

1. Длина ствола

В соответствии с боевым назначением, орудия одного и того же калибра могут иметь различную мощность. Так, например, по состоянию на 1913 г., 10,5-*см* калибру соответствовали орудия, указанные в следующей таблице:

---

[31] См. *Olson.* Shrinkage operations in the construction of built up cannons, Army Ordnance, 1927, v. VIII, p. 156.

Таблица 10. Орудия 10,5-*см* калибра (1913 г.)

	Длина канала клб.	Вес снаряда *кг*	Нач. скорость *м/сек*	Дульная энергия *тм*	Коэфиц. могущества $\frac{A_0}{D^3}$ $\frac{кгм}{см^3}$	Наибольший заряд (округленно) *кг*
10,5-*см* полев. гаубица	14	16	300	73,4	63,5	0,35
10,5-*см* пушка на колесн. лафете.	35	16	700	400	346	3
10,5-*см* морск. пушка	50	16	937	714	617	6,5

В самом деле, в случае полевой гаубицы при длине ствола всего лишь 14 калибров, вследствие малой величины заряда, получается более полное расширение газов, а следовательно и лучшее использование пороха, чем для обоих пушечных стволов. При равной плотности заряжания могло бы быть достигнуто приблизительно одинаковое расширение газов и использование пороха, если бы длины стволов, за вычетом затворной части, имеющей обычно длину от 2 до 3 калибров, были взяты в таком же отношении, как и коэфициенты могущества $\frac{A_0}{D^3}$.

Следовательно, длина ствола должна возрастать с увеличением мощности. На нее налагаются ограничения, вытекающие из условий подвижности и характера боевого применения. В случае большой длины ствола особого внимания требует вопрос о продольной жесткости и колебаниях дульной части.

Для различных орудий можно принять следующие приблизительные длины стволов:

	Коэф. могущества $\frac{A_0}{D^3}$ *кгм/см³*	Длина ствола в калибрах
Мортиры на колесном лафете .	60—190	10—14
Полевые гаубицы		14—20
Полевые пушки и пушки высокой мощности на колесном лафете	190—430	28—40
Пушки максимальной мощности (морские и зенитные)	450—630	40—55 (и более)

Винтовочные стволы, характеризующиеся относительно очень высоким значением коэфициента могущества $\frac{A_0}{D^3}$ от 800 до 1300 *кгм/см*^{3} (верхний предел отвечает наименьшему, 6,5-*мм* калибру), в состоящих на вооружении в настоящее время образцах обладают длиной от 750 до 800 *мм*, т. е. примерно от 90 до 120 калибров. Только в Англии и США имеются хорошо оправдавшие себя, короткие 7,65-*мм* винтовки с длиной ствола в 605 *мм*, т. е. около 80 калибров. Карабины, а в большинстве случаев также и пулеметные стволы, как правило, имеют меньшую длину, чем винтовочные стволы.

2. Нарезка

Для сообщения снаряду необходимой скорости вращения, обеспечивающей его устойчивость на полете, в канале ствола устраивается винтообразная нарезка, состоящая из нарезов и полей, которые врезаются в медный ведущий поясок. Наклон нарезов по отношению к продольной оси или остается постоянным на всем протяжении канала и нарезка в этом случае называется постоянной, или постепенно возрастает по направлению к дулу (для того, чтобы уменьшить давление между выступами пояска и боевыми гранями полей во время действия максимального давления газов), и тогда нарезка носит название прогрессивной. Преимущества и недостатки обоих видов нарезки будут рассмотрены в дальнейшем (стр. 157). Величина наклона нарезки у дула определяется требуемой скоростью вращения снаряда. Чем этот наклон меньше, тем слабее оказывается стабилизирующий эффект волчка, и может произойти опрокидывание снаряда на полете или колебания его оси, вследствие чего получится низкая меткость; в случае же слишком значительной крутизны нарезки, снаряд будет как бы „перестабилизирован", что выразится в том, что его продольная ось не будет совпадать (в особенности при очень крутой траектории) с траекторией, имея сильное стремление сохранить исходное положение, и поэтому снаряд может удариться в цель своей донной частью.

Примером могут служить произведенные в довоенное время опыты с 21-*см* гаубицей, стрельба из которой снарядом определенного типа давала безукоризненный результат при крутизне нарезки [32] в 15 калибров ($= 11°45'$) и при углах

[32] Нарезание канала производится на специальном станке посредством нарезательной головки, протягиваемой сквозь канал. При этом головка получает поворот в соответствии с кривой нарезов. Толщина снимаемой стружки должна быть по возможности малой, — а потому для каждой группы нарезов (одновременно нарезается 4 или

возвышения до 66°. При больших углах возвышения происходило падение снарядов у цели донной частью вперед. С уменьшением крутизны нарезки до 7°10′ (= 25 калибров) снаряды вели себя безупречно вплоть до угла возвышения в 72°.

Назначение крутизны нарезки у дула должно явиться поэтому результатом согласованной работы конструктора ствола и конструктора снаряда и требует надлежащей опытной проверки. Слишком крутая нарезка сопровождается развитием весьма значительных напряжений в пояске и в полях нарезки и в винтовочных стволах приводит к срывам пульной оболочки.

Для современных орудийных стволов можно принять следующие приблизительные значения крутизны нарезки у дула:

от 6° до 7°30′ — для полевых пушек и пушек высокой мощности на колесных лафетах,
от 7° до 10° — для орудий навесного огня с относительно малой начальной скоростью,
от 5°30′ до 6°30′ — для морских пушек максимальной мощности.

Начальный угол крутизны прогрессивной нарезки берется обыкновенно ок. 3°30′—4°.

Для облегчения врезания полей в ведущий поясок, они должны иметь плавный, конусообразный переход к гладкой поверхности каморы и не слишком большую ширину. Следует иметь в виду, однако, что слишком малая ширина полей может привести к их выкалыванию.

Обычная ширина полей нарезки в различных странах составляет 3—4,5 *мм*, а для малых калибров (например в полевых пушках) понижается до 2,5 *мм*, что является не вполне безопасным. Отношение ширины нареза к ширине поля бе-

---

8 нарезов) необходимо многократное протягивание нарезательного инструмента через канал. Перед каждым новым рабочим ходом резцы головки автоматически получают подачу на толщину стружки до тех пор, пока не будет достигнута необходимая глубина нарезов. Остающиеся между нарезами узкие перемычки металла называются полями. При выстреле они врезаются в ведущий поясок снаряда. Вследствие этого на пояске образуются выступы, которые входят в нарезы ствола, как бы в виде винта в матку. При перемещении снаряда в канале, между выступами пояска и полями нарезки, вследствие вращательного ускорения, действует так называемое давление на боевые грани. Наклон нарезки определяется либо посредством угла α, составляемого касательной к кривой нарезов с производящей канала, либо длиной хода нарезов, под которой разумеется то расстояние (L в *см* или $\frac{L}{D}$ в калибрах), на протяжении которого нарезы постоянной крутизны делают один полный оборот: $\frac{L}{D} = \pi \operatorname{ctg} \alpha$.

рется от 1,5 до 2. Число нарезов n берется около $3D$, где D — калибр, выраженный в сантиметрах (рис. 22). Так как нарезание канала производится одновременно для 4 или 8 нарезов, то число нарезов должно быть кратным 4 или 8. Были также предложения применять нарезательную головку, позволяющую производить одновременно нарезание всего канала.

Конический переход (скат) должен обеспечивать возможно плавное врезание полей в поясок. Но, с другой стороны, следует иметь в виду, что устройство слишком длинного и пологого ската влечет за собой более глубокое, чем полагается, вхождение снаряда в канал при заряжании, так что уже даже при небольшом износе полей снаряд получает значительное смещение вперед при заряжании, в связи с чем происходит заметное увеличение каморы. Наклон про-

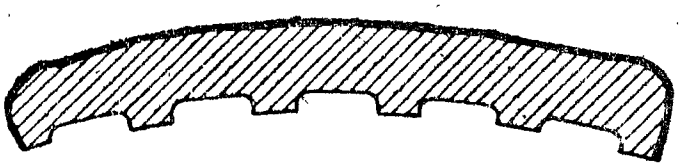


Рис. 22. Профиль прямоугольной нарезки в орудийных стволах

Число нарезов $n \sim 3D$

Рис. 23. Профиль нарезки в английских орудиях по Мэйтдэнду

Число нарезов $n \sim 1{,}6D$

изводящей конического ската составляет обычно около 1 : 10 (по разности диаметров).

Глубина нарезов, как правило, берется от 0,006 до 0,01D. В период мировой войны французские орудия имели относительно меньшую глубину нарезов, чем германские. Глубина нарезов должна быть такова, чтобы она обеспечивала достаточно надежное ведение снаряда даже при некотором износе полей. Однако слишком большая глубина нарезов приводит к развитию сильных напряжений в полях и ведущем пояске во время врезания и к ухудшению обтюрации (см. стр. 114).

Всегда следует иметь в виду необходимость устройства настолько плавного перехода от поля к дну нареза, насколько это возможно без ущерба для ведения снаряда (см. стр. 148—149). Предлагался также и другой профиль нарезки, характеризующийся, например, по Мэйтлэнду весьма пологим переходом от поля к дну нареза со стороны холостой грани. Окончательного суждения о нарезке этого типа пока еще не имеется. Однако, принимая во внимание, что выколы полей происходят вследствие образования трещин со стороны обеих граней (см. рис. 64 и стр. 148), польза

применения нарезки Мэйтлэнда представляется сомнительной, в то время как опасность в смысле ухудшения условий ведения снаряда при развитии износа полей имеется налицо.

Нарезка в винтовочных стволах всегда имеет постоянную крутизну с углом от 5°30′ до 6°, при числе нарезов, обычно равном 4 (рис. 24 и 25). Только в некоторых странах имеет место применение числа нарезов, большего 4, а именно:

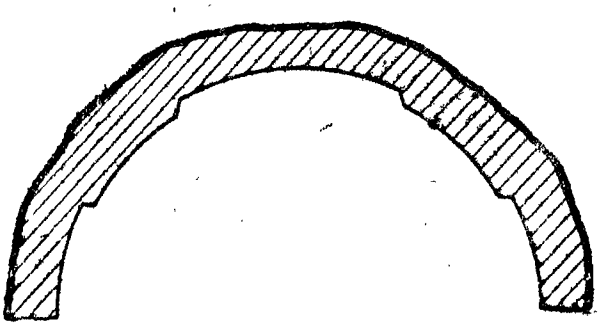


Рис. 24. Профиль прямоугольной нарезки в винтовочных стволах

Число нарезов $n = 4$

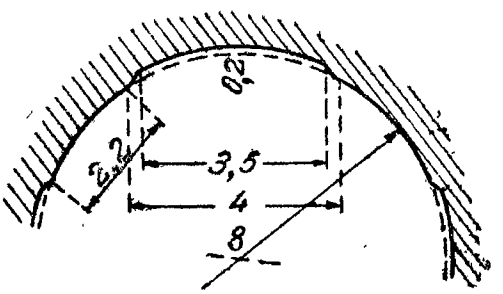


Рис. 25. Профиль трапецеидальной нарезки австрийской винтовки (по Корцену)

Число нарезов $n = 4$

в Англии 5, в Японии и Дании 6. Ширина полей находится в пределах от 1,8 до 2,5 *мм*, глубина нарезов — от 0,1 до 0,2 *мм* [33].

3. Камора

Необходимый вес порохового заряда получается, исходя из величины заданной дульной энергии, но, кроме того, вес заряда, приходящийся на 1 *тм* дульной энергии находится в зависимости от степени расширения газов, а также от характера горения пороха, максимального давления газов, веса снаряда и т. д. Поэтому, орудия максимальной мощности характеризуются худшим использованием пороха.

Порядок величины относительного веса заряда, отвечающего 1 *тм* дульной энергии, на основании известных чис-

[33] Рис. 25 заимствован из книги *A. Korzen.* Waffenlehre. Heft VII, S. 27. L. W. Seidel u. Sohn: Wien 1904.

ловых данных для орудий различных стран, оказывается нижеследующим:

для полевых гаубиц и мортир средней мощности $\frac{L}{A_0}$ = 5—6 *г/тм*

для пушек средней мощности . . 6—7,5 „

для пушек максимальной мощности (порох, содержащий от 25 до 40% нитроглицерина) . . . . 8—9,5 „

Для винтовок 6,5—8-*мм* калибра с современной остроконечной пулей, дающих дульную энергию от ~ 340 до 430 *кгм* (порох пироксилиновый), относительный вес заряда составляет от 7,7 до 9,5 *г/тм*. В случае малого (6,5-*мм*) калибра расширение газов, а следовательно использование пороха и мощность, оказывается хуже, чем при бо́льших калибрах (7,65—8 *мм*).

Все указанные числовые данные являются лишь приближенными величинами. Они зависят от рода пороха и уровня развития пороховой промышленности. Род пороха всегда должен подбираться соответственно весу снаряда, сопротивлению при врезании и объему пороховой каморы (см. также стр. 112). Так, например, еще в старых опытах с двумя винтовочными стволами одинакового калибра, равной длины и имевшими одинаковое число нарезов, но отличавшимися размерами каморы и, следовательно, имевшими гильзы различной величины, три разные сорта пороха дали нижеследующие величины допустимого заряда и относительные значения достигнутой дульной энергии при равном давлении газов и одинаковой пуле:

Сорт пороха (пироксилинового)	Меньшая гильза		Большая гильза	
	вес заряда *г*	относит. значение дульной энергии	вес заряда *г*	относит. значение дульной энергии
A	3,28	1	3,83	1,01
B	3,50	0,89	4,20	1,16
C	3,10	0,97	3,13	0,80

Таким образом оказалось, что в случае меньшей гильзы порох A является лучшим, а порох B — худшим, а в случае большей гильзы последний порох дал наилучший результат, в то время как при употреблении пороха C дуль-

ная энергия получилась заметно меньше, чем для малой гильзы, несмотря на равенство давлений.

Вес заряда в граммах, отнесенный к объему каморы сгорания в $см^3$, определяет плотность заряжания. Для винтовок, в случае применения пироксилинового пороха, последняя принимается, примерно, от 0,77 до 0,9 $г/см^3$. Для орудийных стволов такая плотность заряжания является недопустимой, и при употреблении пироксилинового пороха следует придерживаться значений ее от 0,55 до 0,77 $г/см^3$. Значения плотности заряжания ниже 0,55 $г/см^3$ приводят к неправильному горению пороха. В отношении влияния плотности заряжания на горение пороха поучительное значение имеет наблюдение, показывающее, что в случае стрельбы при слишком малой плотности заряжания имеет место неполное сгорание. Рис. 26 представляет полученный

Рис. 26. Головная волна при остроконечной пуле и несгоревшие зерна пороха в случае выстрела при сильно уменьшенном заряде

посредством искровой фотографии снимок выстрела из винтовки обр. 98 г. при сильно уменьшенном заряде. Из снимка головной волны видно, что неуспевшие еще сгореть частицы пороха выбрасываются из ствола с такой же скоростью, как и пуля. При употреблении нитроглицеринового пороха плотность заряжания никогда не бывает столь высокой, как при пироксилиновом порохе. В случае пороха, содержащего 40% нитроглицерина, уже при плотности заряжания 0,67 $г/см^3$ горение переходит в детонацию с возрастанием давления газов свыше 6000 $кг/см^2$. Применение нитроглицеринового пороха связано с большим объемом каморы и при этом неправильного горения пороха не наблюдается. Поэтому нитроглицериновый порох пригоден для всех орудий, характеризующихся применением переменных зарядов, вплоть до самых малых. В отношении таких орудий и при употреблении больших зарядов можно также без колебаний итти на плотность заряжания 0,4—0,5 и даже ниже, в соответствии с содержанием нитроглицерина.

Для того, чтобы определить необходимый объем пороховой каморы, нужно, в случае гильзовой обтюрации, к объему каморы сгорания прибавить объем, занимаемый самой гильзой. Последний, в зависимости от калибра, составляет от 6 до 10% при раздельном заряжании и от 12 до 15% в случае унитарного патрона. Для винтовочных патронов объем металла латунной гильзы составляет от 30 до 40% каморы сгорания.

В отношении формы каморы существуют два взгляда.

Согласно первому взгляду, уширение каморы должно быть по возможности малым, порядка 5—6% по отношению к калибру, т. е. величина диаметра каморы должна быть не больше той, которая необходима для производства заряжания снаряда. Вследствие этого камора получается длинной, а усилие, прилагаемое к затвору, и его размеры оказываются наименьшими. Этот конструктивный принцип находит наибольшее применение в случае клинового затвора; примером могут служить германские пушки военного времени.

Представители второго взгляда считают, что камора при данном объеме должна быть возможно короткой, за счет значительного уширения по диаметру. Французские морские орудия, например, имеют диаметр каморы от 1,2 до 1,3 D (рис. 2). Поэтому при гильзовой обтюрации подобных орудий нагрузка на затвор получается более значительной, чем в первом случае.

При применении пластической обтюрации, сильно уширенная камора может быть сужена в казенной части до размера, позволяющего производить заряжание, как это имеет место в американских и английских морских орудиях (рис. 3). Таким путем достигается уменьшение усилия, действующего на затвор.

Для того, чтобы в винтовках, отличающихся очень высоким относительным весом заряда, сохранить длину патрона в допускаемых границах, всегда требуется весьма значительное уширение каморы. В состоящих на вооружении винтовках 6,5—8-*мм* калибра нормальной мощности диаметр патрона близ казенного торца составляет обычно 10—11 *мм*. Эта величина возрастает еще более, если требуется повышение мощности за счет увеличения заряда, а следовательно и размеров гильзы. Французская винтовка Лебеля имеет наиболее короткую, а потому и наибольшего диаметра гильзу (диаметр близ закраины 13,8 *мм*). В частности, при проектировании автоматического оружия, устанавливая длину и диаметр патрона, необходимо согласовать между собою, с одной стороны, удобство заряжания, требующее принятия возможно короткого патрона, а с другой стороны — величину усилия, действующего на замок.

Для обеспечения легкой экстракции стрелянных гильз из винтовки, а также из орудийного ствола, имеющего патронное заряжание, продольное очертание каморы должно быть слегка коническим.

Во избежание отрыва газового потока от стенки каморы на участке, не защищенном гильзой, и обусловленного этим образования газовых завихрений, приводящих к усилению износа, необходимо во всех случаях принимать меры к устройству возможно плавного и пологого перехода от указанного участка к нарезной части канала. Наличие резкого перехода в сечении патронной гильзы также сопровождается усилением напряжений в ее стенке.

4. Затворная часть

Полная длина ствола слагается из длины затворной части, длины каморы и пути, проходимого снарядом в канале.

Длина затворной части составляет:

в случае клинового затвора . .	от 2,7 до 3,0 D
в случае поршневого затвора с пластическим обтюратором . . .	„ 2,0 „ 2,5 D

При применении ступенчатого поршневого затвора длина затворной части уменьшается до 1,3 D.

а) Клиновой затвор

Клиновой затвор представляет собою призматическое тело, поперечное сечение которого ослаблено за счет выемок и пазов, необходимых для устройства механизма движения и стреляющего приспособления (рис. 5). Наклон клина, необходимый для прижимания при закрывании затвора и для легкого отставания при открывании, должен быть меньше угла трения. Этот наклон целесообразно делать с падением $\sim 1:40$ и не более $1:25$.

Формула для выражения высоты тела клина (в направлении оси ствола), выведенная автором, исходя из напряжения изгиба, имеет вид

$$h = 1{,}1 \text{ до } 1{,}3\ D\sqrt{\frac{p}{\sigma}}$$

где: p — конструкционное давление газов,
σ — допускаемое напряжение материала.

Коэфициент 1,1—1,3 учитывает то обстоятельство, что сечение клина ослаблено упомянутыми выемками. Поэтому для малых калибров, когда величина этих выемок составляет относительно большую часть общего объема клина, нужно брать большее значение коэфициента, чем для крупных калибров. Напряжения, действующие в теле затвора и в сечении затворной части ствола при выстреле, изме-

няются в пределах от нуля до максимального значения, отвечающего давлению газов. Но так как число циклов напряжений менее 100000, то допускаемое напряжение на изгиб можно принять, исходя из предела текучести, равным

$$\sigma_{доп.} = 0{,}4 \text{ до } 0{,}5\ \sigma_S.$$

При этом должно быть предусмотрено такое внутреннее очертание тела клина, при котором, путем устройства надлежащих выкружек и плавных переходов, неизбежное влияние надрезов было бы сведено к возможному минимуму. Учитывая именно это влияние, а также динамический характер напряжений, действующих в теле затвора, для его изготовления рекомендуется хорошо улучшенная сталь никелевой группы (Cr - Ni, W - Ni и т. д.).

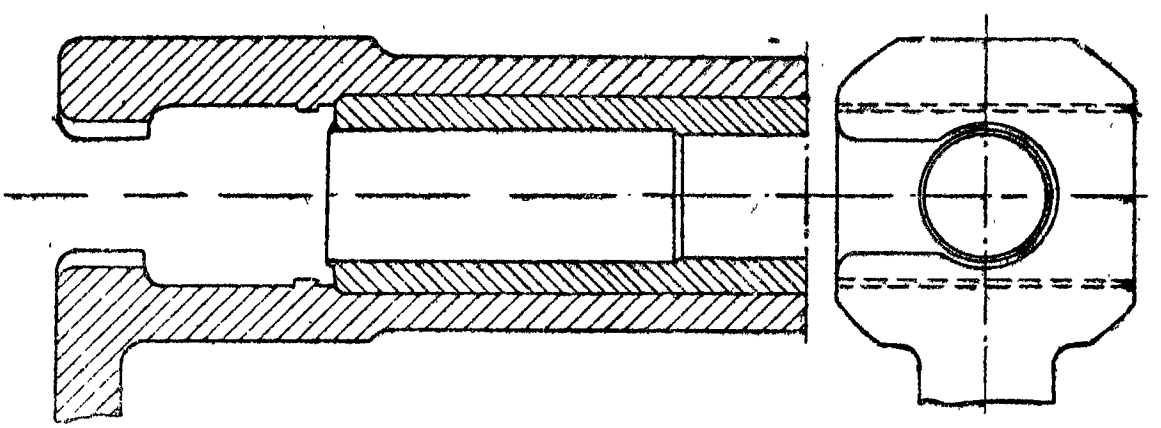


Рис. 27 и 28. Затворная часть 75-*мм* полевой пушки

Рис. 27 (левый) — продольный разрез
Рис. 28 (правый) — вид сзади

Остальные размеры затворной части (рис. 27 и 28) получаются на основании следующих соображений. Обе щеки, между которыми находится тело затвора, подвергаются действию продольного растягивающего усилия Q, обусловленного действием давления газов на затвор. Если поперечное сечение каждой щеки равно f, то величина возникающего в ней продольного напряжения будет

$$\sigma = \frac{\frac{\pi}{4} D_L^2 p}{2f},$$

где: D_L — обозначает диаметр каморы в месте прилегания затвора,
p — конструкционное давление газов.

Но, кроме того, щеки воспринимают еще дополнительное изгибающее напряжение, так как точка приложения силы Q смещена в сторону, и отверстие для заряжания вырезано сбоку, во избежание защемления руки заряжающего но-

мера. Точный учет этого напряжения не представляется возможным. Поэтому автор принимает меньшее допускаемое напряжение, а именно около $0{,}3\,\sigma_S$.

Опорная часть, находящаяся сзади затвора, рассчитывается на срезание. Если длина этой части в направлении оси ствола i, а ширина тела затвора b, то величина наибольшего скалывающего напряжения будет

$$\tau = \frac{3}{2}\,\frac{Q}{2ib}.$$

Согласно теории э.-ф., находящейся в соответствии также и с данными, полученными при действии переменных напряжений в опытах на кручение, $\tau_S = 0{,}57\,\sigma_S$. В качестве допускаемого скалывающего напряжения автор рекомендует $\tau = 0{,}4$ до $0{,}5\,\tau_S$.

б) Поршневый затвор

В прежних поршневых затворах нормальной конструкции нарезные секторы (два или более) занимали только половину боковой поверхности тела затвора для того, чтобы последний легко можно было открыть после соответствующего поворота. В ступенчатых затворах (рис. 6 и 7), получающих все более широкое применение в современных орудиях под нарезку используется большая часть боковой поверхности поршня. Витки нарезки должны удовлетворять требованию открывания и закрывания затвора и вместе с тем обладать надлежащей прочностью при выстреле.

Подъем нарезки должен быть очень небольшим ($\operatorname{tg}\alpha = 0{,}020$—$0{,}025$), меньше угла трения, чтобы прижать обтюратор; в случае же патронного заряжания нарезка изготовляется без всякого подъема.

Если глубина нарезки, — что и имеет место, как правило, — меньше, чем 0,88 рабочей высоты витка, которая в свою очередь назначается от 0,08 до $0{,}09\,D$, то витки рассчитываются по скалывающему напряжению

$$\tau = \frac{3}{2}\,\frac{Q}{l_g h},$$

где: l_g — полная длина рабочего хода нарезки,

h — рабочая высота одного витка,

Q — усилие, действующее на затвор при конструкционном давлении газов.

Учитывая дополнительное изгибающее напряжение, следует принимать в качестве допускаемого напряжения τ только около $^1/_4\,\tau_S$. Давление на поверхность витков, взятое по отношению к проекции их на плоскость, перпендикулярную к оси ствола, не должно превосходить 8—12 *кг/мм*^{2}.

Профилю нарезки придается различное очертание. Во Франции по преимуществу применяется нарезка с профилем в виде равнобедренного треугольника с углом при основании от 40° до 45°. В Германии, для конического ступенчатого затвора применена Круппом нарезка (без подъема) с пилообразным профилем.

К. Заключение

Расчет орудийных стволов до настоящего времени производится по теории наибольшей деформации. Имея в виду новейшие данные металловедения, приводится расчет и по теории энергии формоизменения, который для стволов с нормальной толщиной стенки дает на 20—25% большую величину максимального приведенного напряжения в наиболее напряженном внутреннем слое. При выборе допускаемого напряжения обращается внимание на величину динамического предела упругости или нижнего предела текучести, а также на отклонения, имеющие место при обычном способе измерения давления пороховых газов. Поэтому при определении величины допускаемого напряжения, исходя из результатов обычных испытаний на растяжение, учтены наблюдения, относящиеся к деформации ствола при действии давления, превосходящего предел упругого сопротивления.

В случае ствола моноблока (однослойной трубы), использование материала ствола является неблагоприятным, так как значительные по величине напряжения при выстреле развиваются только во внутренних слоях. Поэтому стволы, подвергающиеся действию очень высокого давления газов, изготовляются таким образом, что в стенке создаются предварительные напряжения, понижающие величины полных напряжений во внутренних слоях в момент выстрела. Эти предварительные напряжения могут быть созданы путем скрепления цилиндрами с натяжением или посредством автофретажа. Для обоих способов даны методы расчета и указаны границы применения.

В целях восстановления современных стволов, подвергшихся износу, они снабжаются ляйнерами, которые вставляются или с натяжением, или, для обеспечения быстрой замены, с зазором. Для обоих случаев произведено рассмотрение конструкции и способа расчета. В заключение приведены указания, относящиеся к анализу конструкции ствола, его проектированию и построению кривой давлений газов, а также рассмотрены такие важные, в отношении устройства ствола, вопросы, как его длина, нарезка, камора и затворная часть.

VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА СТВОЛОВ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

А. Общие соображения

Наблюдая за состоянием поверхности каналов стволов (орудийных или винтовочных) в течение их службы, можно заметить следующие виды разрушения.

1. Процесс механического износа, в результате которого происходит истирание и как бы сошлифование поверхности канала и, в особенности, полей нарезки.

2. Возникновение поверхностных трещин, образующих обычно петлеобразную сетку, которая получает наиболее сильное развитие в начале нарезки и затем постепенно ослабевает по направлению к дулу. Сетка трещин приводит к местным выкрашиваниям металла, причем в орудийных стволах нередко происходит даже выкалывание полей на довольно значительном протяжении.

3. Эрозия* канала, приводящая к разрушению поверхности в виде более или менее глубоких вымываний металла, которые в случае орудий высокой мощности принимают форму как бы оплавленных продольных выемок.

Указанные виды разрушения канала, как правило, проявляют себя одновременно, как бы налагаясь и взаимно влияя друг на друга. Кроме того, в большей или меньшей мере они перекрываются отложениями материала ведущего пояска (меди, томпака, никелевой меди и т. д.). Однако, в зависимости от особенностей работы ствола обычно преобладает тот или иной вид разрушения, являясь таким образом решающим в отношении живучести.

Дальнейшее изложение посвящено исследованию причин и развития явлений разрушения канала и их зависимости от характера усилий, приложенных к стволу, от материала и т. д. Несмотря на основные черты сходства износа орудийных стволов и стволов стрелкового оружия, самое развитие процесса практически протекает различно. Поэтому в дальнейшем износ стволов стрелкового оружия рассматривается отдельно от износа орудийных стволов[34].

---

* См. сноску на стр. 149.

[34] Металлографические исследования, на которые опирается автор в данном исследовании, были проведены частично самим автором в ранее

Б. Винтовочные и пулеметные стволы

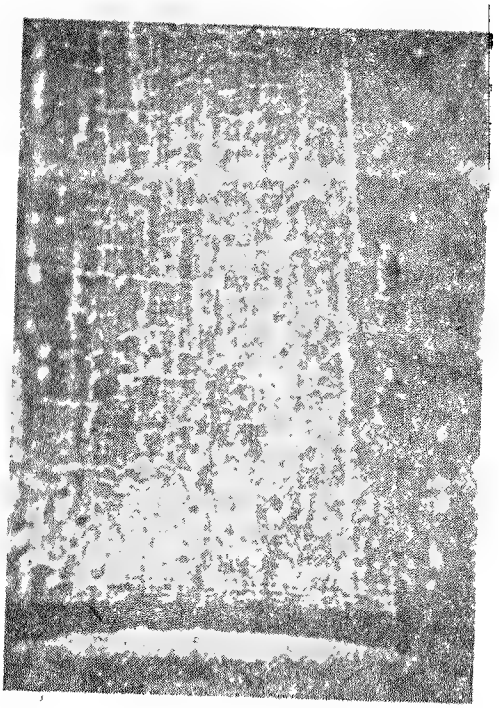
1. Явление износа

Винтовочные, а также пулеметные стволы, снабженные водяным охлаждением, если они изготовлены из хорошей ствольной стали с высокими значениями сопротивления разрыву и предела текучести, имеют срок службы примерно от 10000 до 20000 выстрелов. Если стрельба ведется только одиночным огнем, так что во время пауз между отдельными выстрелами ствол охлаждается настолько, что не происходит заметного повышения температуры его стенок, то срок службы такого ствола значительно увеличивается. По данным фирмы Бёлер (Капфенберг), отдельные стволы, отстрелянные таким порядком прежними тупоконечными пулями, показывали продолжительность службы, достигавшую 50000 выстрелов. Однако, при практическом применении оружия на подобную живучесть рассчитывать не приходится. Последняя будет тем ниже, чем до более высокой температуры нагревается ствол в связи со скоростью ведения огня. Даже в случае обыкновенной магазинной винтовки, при непрерывном ведении скорого огня и прочих равных условиях, срок службы может быть понижен с 10000—20000 выстрелов до 5000 и даже меньшего числа выстрелов. В еще большей степени сказывается режим огня на живучести пулеметных стволов с воздушным охлаждением. В этом случае, в результате непрерывного автоматического огня, уже после 500 выстрелов степень нагрева ствола достигает цвета красного каления (т. е. ок. 700°). В качестве примера можно привести указание Корцена (Korzen) на то, что от ствола пулемета Кольта после 500 выстрелов (две ленты) непрерывного огня можно было закурить папиросу. Поэтому, если пулеметные стволы с воздушным охлаждением применяются для длительной стрельбы непрерывным скорым огнем, то они обладают очень малой живучестью, которая в зависимости от конструкции, свойств стали и режима огня падает до 3000 и менее выстрелов, достигая иногда всего 500 выстрелов.

Картина нормального износа ствола имеет следующий вид. Нарезная часть канала несколько сглаживается на всем протяжении ствола, так как особенно сильному износу подвергаются поля нарезки. Следовательно, имеет место увеличение калибра (диаметра по полям) и уменьшение

руководимой им лаборатории вооружения бывшей Военно-технической академии в Берлине-Шарлоттенбурге, а частично в Институте металлургии и металловедения при Дрезденской высшей технической школе.

Приводимые ниже микрофотограммы были выполнены при помощи ассистента автора, доктора-инженера Шюка, которому автор выражает свою благодарность.



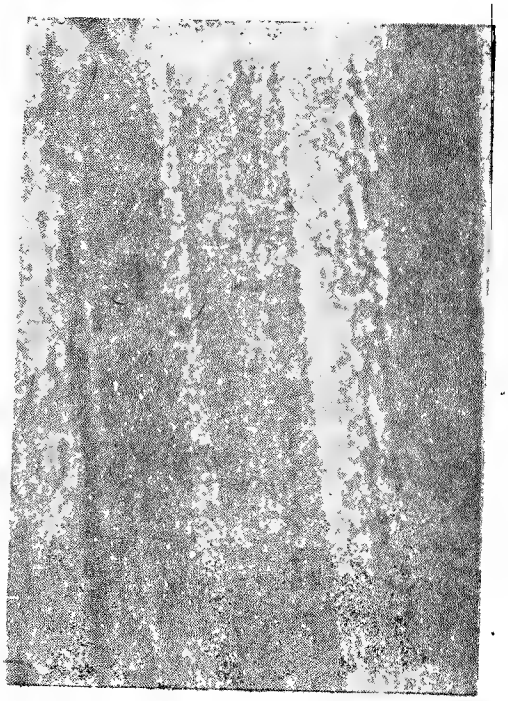


Рис. 29. Винтовочный ствол, начало нарезки

Сетка трещин, начинающееся выкрашивание и кольцеобразная эрозия в начале нарезов

Рис. 30. Винтовочный ствол, место в расстоянии 55 *мм* от начала нарезов

Сетка трещин и выкрашивание левого ребра поля

Рис. 31. Винтовочный ствол, место в 225 *мм* от начала нарезов

Слабо выраженная сетка трещин на полях; нарезы покрыты отложениями материала оболочки пули

Направление стрельбы снизу — вверх

Ув.— 10, уменьш. на $^3/_5$

глубины нарезов. Наиболее значительное сглаживание нарезки наблюдается в начале нарезной части. На этом участке канала поля часто совершенно исчезают и, кроме того, в большинстве случаев здесь же имеет место явление эрозии, в результате которой поверхность канала становится неровной и шероховатой. В дульной части, напротив, поверхность канала остается сравнительно гладкой даже при значительном увеличении калибра, вследствие

износа. Однако, нередко сильный износ, а следовательно и полное сглаживание полей, распространяется вплоть до дульного среза. Следствием увеличения калибра и сглаживания полей является нарушение правильности ведения пули в канале, постепенно приводящее к значительному рассеиванию и получению срывов пуль при стрельбе.

На поверхности канала изношенного ствола всегда наблюдается петлеобразная сетка трещин. Правда, иногда эту сетку сразу заметить не удается, вследствие отложения металла оболочки пули, и она отчетливо выявляется лишь после растворения отложившегося слоя соответствующим реактивом[35]. Наиболее крупная и сильно развитая сетка трещин, приводящая к выкрашиваниям металла, образуется в начале нарезной части. По направлению к дулу сетка трещин становится все слабее выраженной, получает более тонкое строение и часто делается едва заметной. Фотограммы рис. 29, 30 и 31 служат иллюстрацией сказанного. В начале нарезов наблюдается, как правило, кольцеобразная эрозия (в сочетании с тонкой сеткой трещин), являющаяся результатом завихрений газового потока в начале нарезов (см. рис. 29). Кроме того, в большей или меньшей степени имеют место следы эрозии в продольном направлении, имеющие характер разъедания металла. В винтовочных и пулеметных стволах преобладающей причиной разрушения канала является механический износ. Поля постепенно истираются настолько, что ведение пули становится невозможным, следствием чего является падение меткости и срывы пуль. Образование трещин способствует развитию износа, делая поверхность канала шероховатой и увеличивая трение. Однако трещины не служат причиной утраты боеспособности ствола. Возникновение трещин вызывается термическим действием и влиянием коррозии. Эти факторы, имеющие преобладающее значение в отношении орудийных стволов, будут обсуждены при рассмотрении вопроса о живучести последних.

2. Возникновение и ход развития износа

В винтовках, стреляющих серийным скорым огнем (Schnellfeuerserien) процесс износа, по мере увеличения числа сделанных выстрелов, развивается примерно следующим образом. После $^1/_5$—$^1/_4$ общего числа выстрелов, определяющего срок службы ствола, наблюдается небольшой износ полей и, в частности, округление ребер. Это

[35] В случае отложения томпака, в качестве реактива для его растворения, можно рекомендовать свежеприготовленный аммиачный раствор окиси меди $[Cu(OH)_2 \cdot 4\,NH_3\,H_2O$. *(Прим. ред.)*], который на сталь почти не действует.

явление в общем случае перекрывается отложением никеля или томпака, вследствие истирания оболочки пули. Если отложенный слой тем или иным способом удалить, то при продолжении стрельбы он появляется вновь. Скругление ребер полей и их сглаживание с увеличением числа сделанных выстрелов развивается все время и все с большей быстротой. Наряду с увеличением диаметра канала начинает происходить выкрашивание металла, и тем с большей силой, чем более высокой температурой горения обладает порох. Это явление обнаруживается особенно при наличии кольцеобразной эрозии в начале нарезов и у среза дульца гильзы. Первые заметные признаки разрушения канала от эрозии хорошо наблюдаются после $^1/_2$—$^3/_4$ общего числа выстрелов, определяющего срок службы ствола.

В конечном счете ствол утрачивает боеспособность вследствие того, что прекращается надлежащее ведение пули полями нарезки и происходит сильный прорыв газов между пулей и стенками ствола. Рассмотрение серии пуль, перехваченных посредством пулеулавливателей в процессе длительной стрельбы, ясно показывает постепенное (по мере продолжения стрельбы) уменьшение отчетливости и длины отпечатков на поверхности пуль. Результатом ухудшения ведения пуль в канале является их сильное рассеивание, а значительный прорыв газов имеет следствием разброс значений начальной скорости.

Распределение износа по длине ствола, измеренное посредством набора калибров, не является во всех случаях одинаковым. Согласно опытным данным, относящимся к магазинным винтовкам различного калибра, изготовленных из различных сталей, можно указать три характерные группы кривых диаметрального износа, схематически представленных на рис. 32—34. Группы 1 и 2 являются характерными главным образом для тупоконечных пуль, имеющих длинную ведущую часть, а группа 3 — для современных остроконечных пуль с короткой ведущей частью, применяемых в условиях высокого давления газов. Минимальный по диаметру калибр в случае группы 3 входит в канал настолько глубоко, что позволяет установить местное сужение канала. Положение этого сужения зависит от устройства ствола и пули, и наличие его служит следствием отчасти местного сжатия стенок ствола, а отчасти — отложения в этом месте канала материала пульной оболочки. Кривые группы 1 являются особенно характерными для стволов, изготовленных из высококачественной стали и обладающих относительно большой живучестью при стрельбе тупоконечными пулями.

Таким образом, явление разрушения каналов стволов стрелкового оружия сводится к процессу истирания, кото-

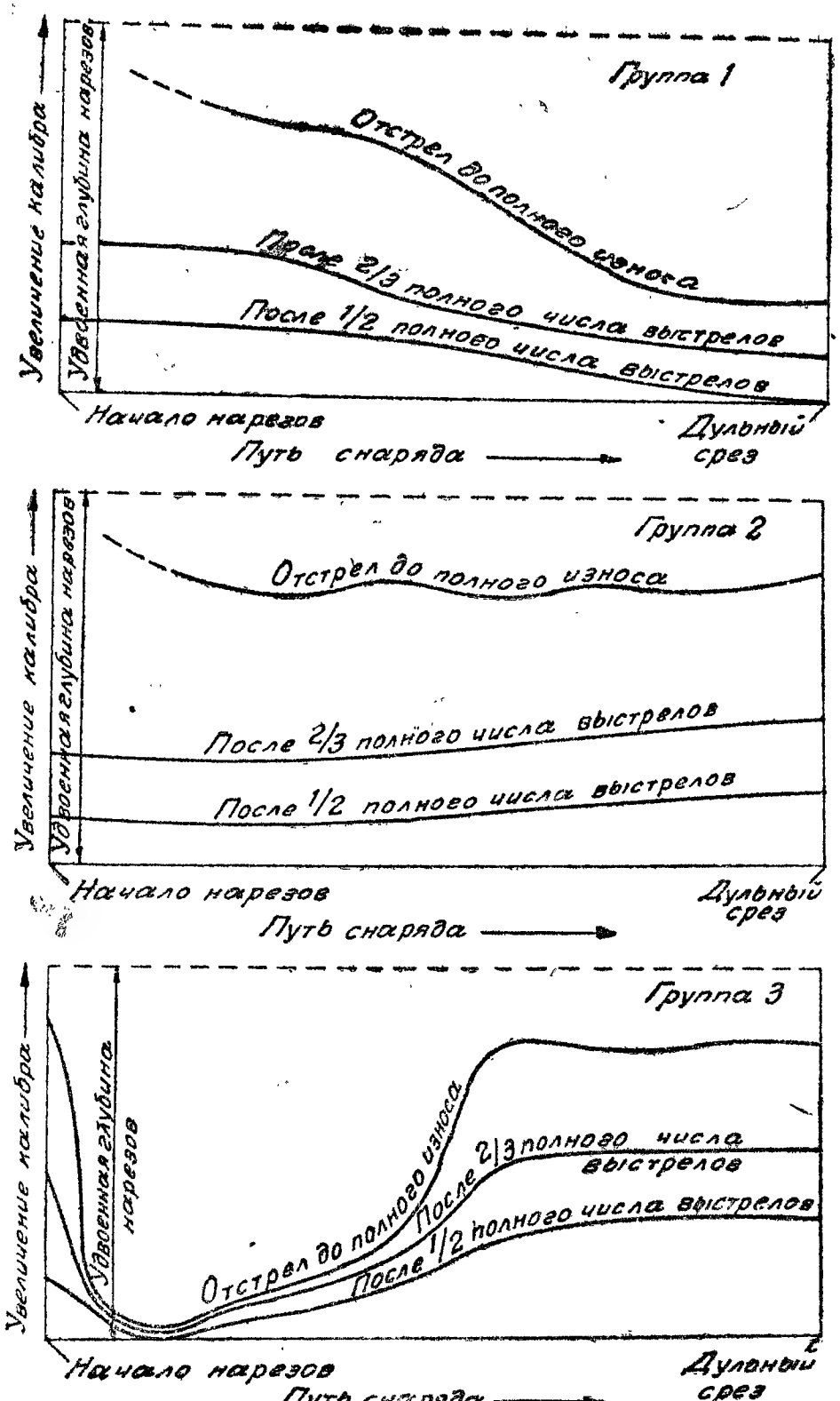


Рис. 32, 33, 34. Диаметральный износ винтовочных стволов

Рис. 32: группа 1. Рис. 33: группа 2. Рис. 34: группа 3

рый усиливается за счет образования трещин. Возникновение же и развитие последних находится в тесной связи как с этим процессом, так и с другими факторами, из которых преобладающее значение имеет температура. Поэтому высокие темпы стрельбы, применение пороха, выделяющего большое количество тепла, недостаточно интенсивное охлаждение ствола — все эти причины приводят к значительному ускорению износа канала. Решающее влияние на живучесть ствола, при прочих равных условиях, имеют также такие факторы, как конструкция пули, качество материала пульной оболочки и ствола, условия работы последнего и устройство нарезки, характер горения пороха и состав образующихся газов. Каждый их этих факторов рассматривается в отдельности в дальнейшем изложении. Однако следует отметить, что строгое разделение их, ввиду взаимного влияния друг на друга, не представляется возможным.

3. Конструкция пули и трение

Конструкция пули современного стрелкового оружия характеризуется, как правило, наличием прочной оболочки (за исключением Франции, где применяется сплошная пуля из сплава меди с 10% цинка), в которую заключен сердечник из свинца, содержащего несколько сотых долей сурьмы. Оболочка обычно изготовляется из листовой стали, плакированной на 5—10% своей толщины медно-никелевым сплавом или томпаком. Пуля должна удовлетворять требованию хорошего ведения по нарезам и вместе с тем давать надлежащую обтюрацию. Поэтому, для обеспечения врезания полей, диаметр ведущей части пули должен несколько превосходить диаметр канала по полям (калибр) на величину так называемого форсирования. Для того, чтобы врезание полей в ведущую часть пули происходило постепенно, эта часть всегда должна иметь коническую поверхность. Длина ведущей части составляет от 0,3 до 0,4 всей длины пули, причем лучше придерживаться несколько повышенного (до 0,35) значения нижнего предела. При короткой ведущей части получают место колебания пули в канале, вследствие чего сопротивление воздуха при полете пули повышается, и происходит падение меткости, особенно понижающее эффективность оружия при стрельбе на большие дистанции. Еще большее сокращение длины ведущей части пули приводит к получению рикошетов. Чем короче ведущая часть, тем большим форсированием должна она обладать. Коническая форма рассматриваемой части пули приводит к тому, что, по мере износа полей при стрельбе, рабочая длина этой части постепенно уменьшается. Так,

например, для тупоконечной пули, обеспечивавшей живучесть ствола из определенного материала при определенных условиях отстрела в 5500 выстрелов, было установлено:

при числе сделанных выстрелов в процентах от общего числа . .	45	66	90
уменьшение длины ведущей части в процентах	2,5	10,8	15,4

Указанная длина определялась путем обмеров пуль, перехваченных пулеулавливателем. Так как очень короткая ведущая часть в связи с износом канала может ускорить наступление момента увеличения рассеивания выше допускаемой нормы, то последнее обстоятельство следует также принимать в расчет при назначении длины этой части пули.

Прежние тупоконечные пули обладали относительно более длинной ведущей частью, чем современные остроконечные. Однако, длинная ведущая часть дает неблагоприятные результаты в отношении трения и, в связи с этим, усиливает износ. Поэтому тупоконечные пули не могли иметь столь значительного форсирования, которым обладают современные остроконечные пули с относительно короткой ведущей частью. Донная часть пули должна, кроме того, давать надежную обтюрацию от прорыва пороховых газов, начиная с момента вхождения пули в нарезную часть канала. По этой причине диаметр донной части должен быть лишь на очень малую величину меньше диаметра канала по нарезам или даже равняться ему. Обтюрация будет достигаться только за счет форсирования и течения металла сердечника пули.

Против повышенного форсирования говорит то обстоятельство, что при этом потребуются очень большие усилия при врезании пули и повысится давление газов.

Конструкция пули зависит также от характера горения пороха. Вообще можно считать, что, при данном составе пороха, скорость горения, а следовательно и давление газов, возрастает с увеличением поверхности горения заряда (тонкий порох), плотности заряжания и сопротивления врезанию. Характер горения пороха предопределяется его химическим составом и химической обработкой поверхности зерен при изготовлении. Для каждого типа пули, плотности заряжания и т. д. должен подбираться соответствующий сорт пороха (ср. стр. 98). При слишком малой плотности заряжания горение будет неравномерным, примером чего может служить рис. 26.

Если форсирование настолько велико, что одновременно с врезанием полей происходит своего рода обжатие (Einpressung) пули, то давление газов может весьма значительно повыситься. Так, при опыте с гильзой, имевшей несколько утолщенную стенку в дульце, вследствие чего происходило защемление пули, наблюдалось повышение давления газов до 4200 *кг/см*^{2} вместо нормального давления в 3200 *кг/см*^{2}. То же самое происходит и в случае применения нормальных гильз и пуль, когда колебания в величинах допусков по диаметрам пули и канала (по полям) вызывают заметные изменения в давлении газов — всегда в направлении возрастания последнего с увеличением форсирования.

Отсюда следует, что в пулеметных и ружейных стволах нормального устройства нужно избегать излишне большого форсирования. Оно должно иметь величину, достаточно обеспечивающую должную обтюрацию и ведение пули в умеренно изношенном стволе. В отношении стволов с воздушным охлаждением особое внимание должно быть уделено учету расширения канала вследствие нагрева стенок. Известно, например, что калибр 8-*мм* ствола при нагреве до 400° увеличивается, примерно, на 0,03 *мм*.

Если металл пули обладает повышенной прочностью вследствие значительной толщины оболочки или ее высокой твердости, а также в связи с применением стального сердечника, как это имеет место для бронебойных пуль, — то давление при врезании, а следовательно и сопротивление, которое встречает пуля в начале ее движения в нарезной части, заметно возрастает. При этом происходит особенно значительное повышение износа канала именно в начале нарезки.

С другой стороны, безусловно недопустимым является применение пуль из слишком мягкого материала.

В виду того, что при заряжании пуля не вполне плотно входит в нарезы, в начальный момент ее движения имеет место неизбежное явление прорыва пороховых газов через зазор между пулей и стенками канала. В наиболее выраженной форме это явление наблюдается при стрельбе очень короткими пулями, дающими плохую обтюрацию. Это особенно относится к пистолетам, для которых, впрочем, вопрос о прорыве газов не имеет большого практического значения. Приведенные на рис. 35-37 фотограммы, полученные посредством искровой съемки, иллюстрируют явление прорыва газов в самозарядном пистолете.

При данном типе пули прорыв газов очевидно усиливается с увеличением диаметра канала на начальном участке, отвечающем положению пули при заряжании, и с углублением нарезов, так как при этом ухудшается обтюрация в момент смещения пули. В связи с этим заслуживают

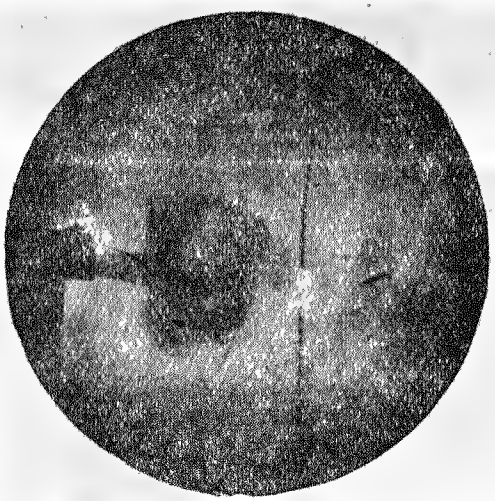


Рис. 35, 36, 37. Прорыв газов в автоматическом пистолете, стреляющем тупоконечной пулей

Рис. 35. Пуля еще в стволе

Рис. 36. Пуля у дульного среза

Рис. 37. Пуля в облаке порохового дыма

интереса фотограммы рис. 38 и 39, показывающие влияние изменения глубины нарезов в винтовочном стволе. Отсюда следует, что назначение размеров канала в начале нарезки и глубины нарезов должно производиться с особым вниманием. Углубление нарезов (или, что то же, увеличение высоты полей) отдаляет момент сглаживания полей. Но зато большая глубина нарезов влечет за собой, как сказано выше, усиление прорыва газов, что в свою очередь приводит к неблагоприятным результатам в смысле развития износа и условий ведения пули. Если же одновременно с углублением нарезов увеличить соответственно форсирование, то последнее обстоятельство приведет, как известно, к сильному возрастанию давления при врезании и повышению трения, а следовательно к усиленному износу начала нарезной части. Принятая в различных образцах винтовки Маузера глубина нарезов от 0,125 до 0,150 *мм* хорошо себя оправдала. В целях возможно большего понижения местных напряжений в металле стенки ствола и оболочки пули,

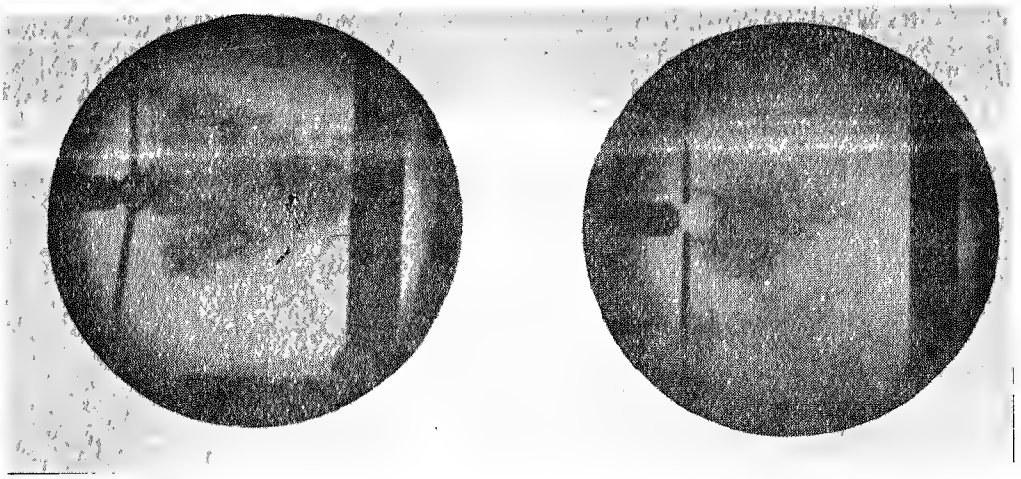


Рис. 38 и 39. Влияние глубины нарезов в пулеметном стволе на прорыв пороховых газов при стрельбе пулей одинаковой конструкции

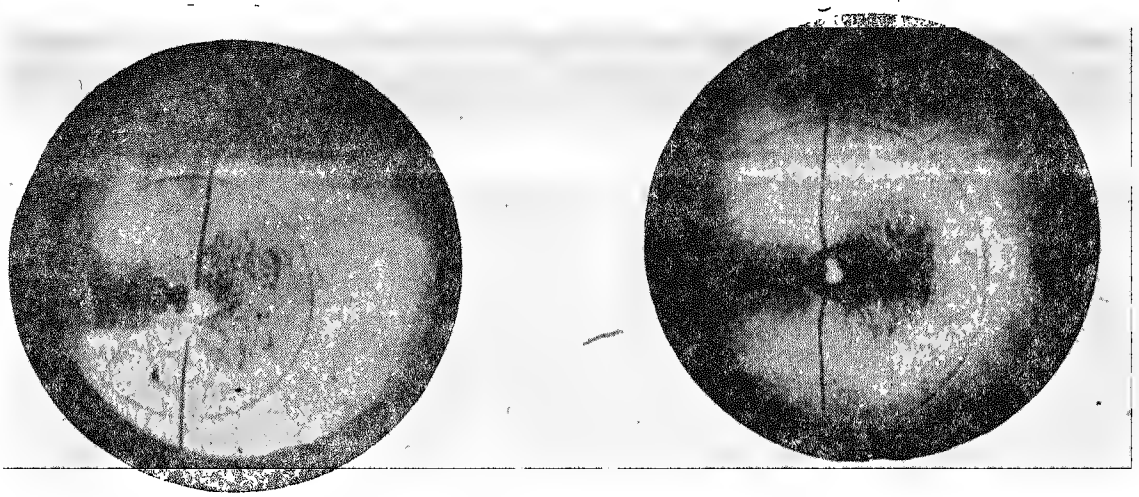
Рис. 38. Глубина нарезов 0,18 *мм* Рис. 39. Глубина нарезов 0,125 *мм*

Снимки сделаны в момент вылета пули из ствола

а также для лучшей обтюрации, выступающие и входящие углы профиля нарезки должны быть хорошо закруглены.

Так как в начале перемещения пули прорывающиеся газы обладают невысоким давлением, то они не оказывают влияния на пульную оболочку нормальной прочности. Если же материал оболочки отличается мягкостью и недостаточной прочностью, то при сильном прорыве газов произойдет деформирование оболочки в виде смятия ее в поперечном направлении. Эта деформация ухудшит условия ведения пули, понизит ее меткость и будет сопровождаться усилением прорыва газов. Указанные явления в особенности следует иметь в виду при стрельбе из стволов, уже в некоторой степени изношенных. Примером сказанного могут служить фотограммы рис. 40—42, относящиеся к одной из иностранных винтовок, имеющих тупоконечную пулю старого образца. При стрельбе пулей хорошего качества прорывающиеся газы (рис. 40) вредного влияния на нее не оказывают. В случае же применения пули из слишком мягкого материала, давление газов на боковую поверхность оболочки деформирует пулю так, что она получает остаточное удлинение. Подобные образцы пуль, деформированных в результате усиленного прорыва газов (рис. 41) и неправильного ведения в канале, показаны на рис. 42.

Выбор надлежащего материала пульной оболочки имеет существенное значение не только с точки зрения прочности пули, развития давления газов и обеспечения надежного ведения по нарезам, но и в отношении непосредственного влияния на явление износа канала. В связи с этим необходимо остановиться на рассмотрении законов сухого трения.



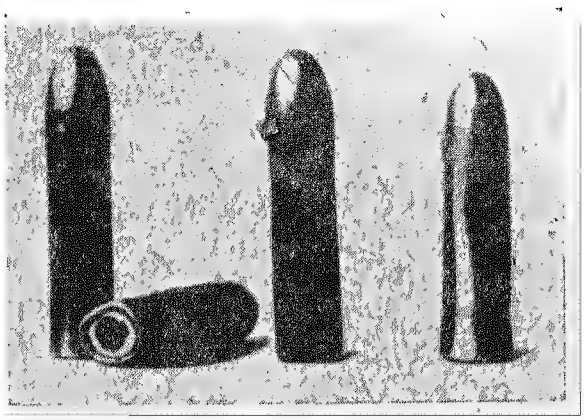


Рис. 40, 41, 42. Прорыв газов в пулеметном стволе

Рис. 40 (наверху левый). Пуля хорошего качества

Рис. 41 (правый). Неподходящая пуля

Рис. 42. Не удовлетворяющие назначению пули, деформированные прорывающимися пороховыми газами

При перемещении пули в канале имеет место скольжение без смазки. Осуществление надежной смазки не представляется возможным; покрытие канала графитным порошком также не оказывает достаточного действия. Коэфициент сухого трения $\mu_{сух.}$ для всех металлов с повышением нормального давления сначала возрастает сравнительно быстро и приближается к некоторому предельному значению, которое при дальнейшем, даже весьма значительном увеличении давления, остается почти неизменным. Величина коэфициента сухого трения зависит от природы трущихся между собою металлов. Кривые рис. 43 показывают зависимость $\mu_{сух.}$ от нормального давления согласно опытным данным Ренни (Rennie)[36]. Кроме того, на том же рисунке показаны вычисленные значения $\mu_{сух.}$, отвечающие нормальному давлению $p = \infty$. Нетрудно видеть, что для такого давления значение коэфициента трения латуни по чугуну (ок. 0,25) сильно отличается от значения коэфициента трения железа по железу (ок. 0,45).

[36] См. Hütte. Справочник для инженеров. Часть 1, изд. 21, стр. 242, Ernst u. Sohn: Berlin 1911.

Однако приведенные кривые являются еще недостаточно показательными для действительного поведения металла. Правда, произведение коэфициента трения и нормального давления само по себе служит достаточным признаком для оценки затраты работы и, в связи с этим, износа. Чем выше значение μ, тем больше будет износ при равном давлении. Но износу могут подвергаться или оба трущихся металла одновременно, или практически только один из них. В стволах огнестрельного оружия как раз и должен иметь место второй случай. Поскольку речь идет об износе вообще, то он может быть признан допустимым лишь в отношении материала пульной оболочки (или ведущего пояска снаряда) и по возможности не должен иметь места в отно-

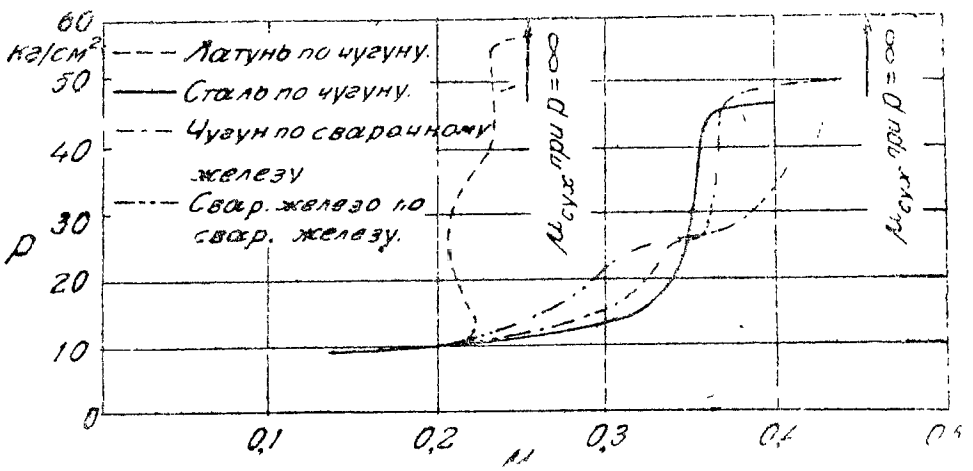


Рис. 43. Коэфициенты трения (сухого) $\mu_{сух.}$ в зависимости от давления на поверхности p

Согласно опытным данным Ренни

шении металла ствола. Но это зависит не только от твердости материала.

В связи с этим вопросом автором были произведены следующие опыты. В тщательно и чисто обработанные отверстия образцов ствольной стали, вращавшихся на токарном станке, запрессовывались под большим давлением, без применения смазочных средств, неподвижные призматические образцы из различных металлов. Таким образом воспроизводилось сухое трение испытуемого металла по ствольной стали. Испытаниям были подвергнуты: хорошо отожженная и сильно наклепанная чистая медь, мягкая и нагартованная латунь (72% Cu), алюминий, цинк и мягкое, отожженное электролитическое железо. Каждое из испытаний продолжалось до появления цветов побежалости (от желтого до синего) на стальном образце, вследствие его нагрева за счет теплоты

трения [37]. Во всех случаях, как и следовало ожидать, происходило истирание испытуемых металлов, как более мягких, чем ствольная сталь. Износ последней в результате опытов с медью, латунью, алюминием и цинком оказался весьма незначительным. Но вместе с тем указанные металлы показали существенное различие между собою в другом отношении. Медь вообще, а в особенности холоднокатанная, дала лишь ничтожные отложения на стали, которые не образовывали металлического покрытия в собственном смысле слова. При испытаниях от меди отделялись постепенно тонкие стружки, но они не давали плотного приставания к стали. По иному вела себя латунь. При длительном испытании образовывался тонкий, но очень прочно прилипавший к стали, сплошной слой латуни, который покрывал полностью поверхность трения. Еще более значительной толщины покрытие откладывалось на стали при испытании алюминия и цинка, которые и истирались в наиболее сильной степени. В связи с образованием указанных покрытий происходило таким образом значительное усиление износа соответствующих испытуемых металлов. Усиление износа наблюдалось также в случае менее тщательной обработки отверстия стального образца (однократная расточка). Но соотношения между отдельными металлами в смысле их поведения при опытах оставались по существу теми же самыми.

Из числа испытанных цветных металлов наилучшим оказалась, следовательно, медь и в особенности в наклепанном состоянии. В отношении влияния на сталь все эти металлы показали или отсутствие, или весьма ничтожную степень истирания. Но зато мягкое электролитическое железо проявило себя совершенно иначе. Несмотря на то, что его твердость была почти одинакова с твердостью отожженной меди, результаты испытания на трение железа по стали оказались несравненно более неблагоприятными, чем при опытах с медью. Уже через небольшой промежуток времени от начала испытания происходило не только изнашивание электролитического железа, но и сильное истирание поверхности стали. Обнаруженное различие между поведением железа и меди оказалось значительно более существенным, чем это можно было бы предвидеть, исходя из соответствующих величин коэфициента трения.

Таким образом, даже самое мягкое железо при скольжении по стали приводит к сильнейшему износу рабочей поверхности последней. Следовательно, для непосредственного применения в качестве материала ведущей части оно

[37] Опыты проводились с двумя сортами ствольной стали, а именно: с улучшенной углеродистой сталью и с одной из специальных сталей. Какого-либо заметного различия в поведении обоих сортов стали обнаружено не было.

является непригодным. Это положение относится в равной мере как к оболочке пули, так и к рассматриваемым в дальнейшем ведущим пояскам снарядов.

В отношении механических свойств сталь является весьма подходящим материалом для изготовления пульных оболочек. Но идущая для этой цели листовая сталь должна иметь покрытие из другого металла (медь, томпак, никелевая медь) такой толщины, которая обеспечивала бы стальную основу оболочки от соприкосновения с поверхностью канала при врезании полей и истирании пули за время прохождения ею канала ствола. Поэтому простое электролитическое покрытие пули медью или никелем является недостаточным.

Вопрос о том, какому металлу в качестве покрытия оболочки пули следует отдать предпочтение, остается пока еще нерешенным. Томпак представляется лучшим материалом, чем более твердая, никелевая медь. Дальнейшие исследования показали, однако, что, например, легированная медь, содержащая небольшое количество (от 2 до 4%) олова или цинка, дает еще лучшие свойства. Чистая медь, не получившая повышенной твердости при холодной протяжке, повидимому, слишком мягка. Алюминий, цинк и т. д. должны быть исключены, вследствие относительно низкой температуры плавления; кроме того, в случае применения этих металлов следует ожидать усиленное их истирание и образование обильных отложений на поверхности канала.

Дальнейшее усложнение вопроса об износе пульной оболочки и металла ствола определяется влиянием таких факторов, как температура и коррозионное действие пороховых газов.

Новые исследования, относящиеся к сухому трению при качении [38], показали, что износ при сухом трении всегда сопровождается и зависит от происходящего при этом химического процесса (окисления). Если устранить возможность окисления путем производства опыта в безвоздушном пространстве или в атмосфере только азота, то коэфициент трения и износ сильно понижаются. Действие окисления при трении, имеющее место в присутствии уже самого незначительного количества кислорода, оказывается настолько сильным, что ему поддаются даже нержавеющие стали (V2A* и др.).

Кроме влияния температуры пороховых газов, существенное значение имеет их химическое действие. Возможно, что усиленный износ, связанный с применением нитроглицери-

---

[38] *M. Fink* u. *U. Hofmann*. Z. anorg. allg. Chem. 210 (1933), S. 100; Arch. Eisenhüttenwes 6 (1932/33). S. 161.

* Сталь, содержащая 18% Cr и 8% Ni. *(Прим. ред.)*.

новых порохов, следует отнести не только на счет очень высокой температуры горения, но и приписать избытку кислорода в газообразных продуктах разложения этих порохов. В процессе износа при трении точно так же может иметь значение взаимодействие между углекислым газом и железом при высоких температурах. Но при этом необходимо особенно подчеркнуть, что влияние указанных моментов сводится к чисто поверхностному эффекту в канале ствола. При весьма детальном металлографическом исследовании изношенных винтовочных стволов ни в одном случае не наблюдалось изменения структуры, обезуглероживания и т. п. явлений на доступную для измерения глубину (от поверхности канала вглубь стенки). Область влияния поверхностного химического воздействия на явления, происходящие при трении, требует дальнейших научных исследований.

4. О влиянии высокой температуры нагрева поверхности канала

С повышением температуры нагрева ствола износ всегда значительно возрастает. Пока является невыясненным, каким образом температура влияет непосредственно на самый процесс трения и как зависит последний от предварительного химического воздействия пороховых газов. В этом направлении также нужны дальнейшие научные исследования. Но несомненным является тот факт, что износ ствола заметно увеличивается, если ствольная сталь характеризуется значительным понижением предела текучести с повышением температуры, в особенности, если это понижение имеет место при нагреве уже свыше 200°. Точно так же и коррозионное действие пороховых газов, влияющее на процесс образования трещин, вызванных тепловыми напряжениями, с повышением температуры усиливается (см. по этому поводу ниже—об образовании сетки трещин в орудийных стволах).

Затем, в отношении трения большое значение во всех случаях имеет состояние поверхности канала. Чем более гладкой является последняя, тем меньше трение и износ металла. Местные выкрашивания металла и тонкие трещины, постепенно образующиеся на полях и нарезах, приводят к сильному возрастанию трения и, следовательно, к повышению усилий при истирании. Поэтому, возможно лучшее содержание канала в смысле гладкости его поверхности является важной задачей. Но при этом нельзя, конечно, допускать такого положения, чтобы ствол постепенно изнашивался только в результате постоянной чистки канала сильно действующими средствами.

Как уже было показано на рис. 32, 33 и 34, износ по длине ствола происходит неравномерно. В условиях стрельбы современными остроконечными пулями при высоком давлении газов, в изношенных стволах, примерно в 60—100 *мм* от начала нарезов (или даже далее), наблюдается местное сужение канала (рис. 34). Последнее может образоваться, как уже указывалось выше, вследствие отложения материала оболочки пули или в результате местного сжатия стенок ствола. Но даже на участке этого сужения поля нарезки в той или иной мере всегда изношены. Рассматриваемое сужение приводит к местному повреждению канала.

Рис. 44. Пулеметный ствол, получивший раздутие вследствие торможения пули и смятия ее в месте локального сужения канала

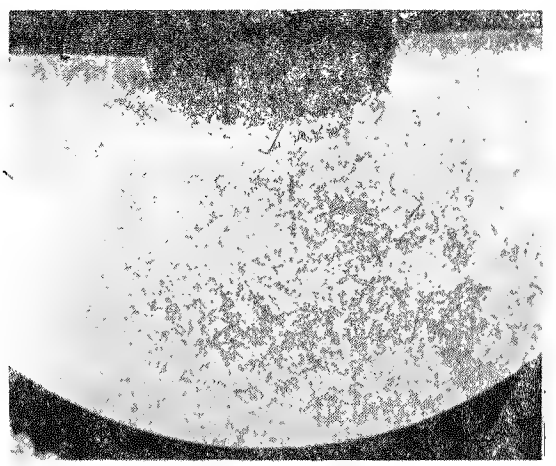


Рис. 45. Пулеметный ствол, давший раздутие вследствие торможения пули, и характеризующийся наличием глубоких трещин коррозионного происхождения

Первый, наиболее сильно изношенный участок канала пуля проходит при наличии лишь слабого сопротивления, а затем, по достижении сужения, претерпевает внезапно сильное торможение. Следствием последнего является смятие и даже раздробление пули, приводящее в свою очередь к раздутию ствола (рис. 44). В зоне подобного раздутия, как правило, обнаруживается обильное отложение свинца. Известно, что нередко происходит разрыв стволов охотничьих ружей в тех случаях, когда в канал попадает снег или земля, образуя как бы пробку, вызывающую внезапное торможение пули или дробового заряда. Поэтому важное значение имеет своевременное удаление из канала крупных отложений меди или никеля. Причиной образования местного сужения может послужить также смятие металла ствола.

Раздутия пулеметных стволов, изготовленных из хрупкого материала, вследствие влияния ранее образовавшихся трещин (рис. 45), играющих роль надрезов, могут привести к разрывам.

5. Влияние пороха. Теплоотдача пороховых газов

Как уже выше указывалось, природа пороха и характер его горения имеют большое значение. При равной мощности оружия нитроглицериновый порох всегда приводит к большему износу ствола, чем пироксилиновый. Обычные винтовочные стволы, отстрелянные одинаковыми пулями, с одинаковой начальной скоростью и при одинаковых условиях стрельбы, в случае применения чистого пироксилинового пороха выдерживают на 25—40% большее число выстрелов, чем при нитроглицериновом порохе. Для орудийных стволов это соотношение меняется в еще менее выгодную для нитроглицеринового пороха сторону. Главной причиной столь различного влияния порохов является температура горения, с повышением которой усиливается степень нагрева внутреннего слоя ствола. Общий же нагрев ствола в случае нитроглицеринового пороха лишь на немного больше, чем при пироксилиновом порохе. Важное значение имеет также и химическое воздействие пороховых газов в смысле коррозионного влияния или в отношении усиления эффекта трения.

Относительно передачи тепла стенке ствола необходимо отметить следующее. При хорошей обтюрации пули количество прорывающихся газов весьма мало и их тепловое воздействие оказывается недостаточным, чтобы вызвать разрушения эрозионного характера. Нагрев стенок ствола происходит в основном за счет газового потока, находящегося в заснарядном пространстве. Теплообмен, обусловленный этим потоком, значительно возрастает, если в каком-либо месте внезапно возникают сильные газовые завихрения. Это явление получает место в пульном входе; здесь всегда наблюдается кольцеобразное разрушение поверхности канала эрозионного происхождения (рис. 29). Шероховатости на поверхности канала также способствуют образованию газовых завихрений, следствием чего является высокий местный нагрев и эрозионные разрушения. Среди этих шероховатостей первое место, в смысле влияния на эрозию, занимают участки местных выкрашиваний металла, образовавшихся в результате развития сетки трещин. На указанных участках могут происходить настолько сильные прорывы газов, что они иногда приводят к образованию как бы местных оплавлений металла (рис. 46). Приток тепла от газового потока (в особенности в случае образования завих-

рений) приводит к мгновенному перегреву тонкого поверхностного слоя канала. Этот перегрев имеет решающее значение в отношении образования трещин (см. стр. 145). Непосредственно сразу после выстрела, в силу теплопроводности, происходит выравнивание температуры по всей толщине стенки. Если между стенками канала и пулей значительного прорыва газов не происходит, то места соприкосновения пули со стенками канала приобретают общую температуру стенки ствола еще до вылета пули из канала, ибо при наличии безупречной обтюрации происходит лишь местный нагрев за счет газового потока, движущегося за снарядом. Поэтому первенствующее значение для износа ствола при хорошей обтюрации имеет та температура стенки в соответствующем сечении, которая создается во время паузы между двумя смежными выстрелами. Иначе обстоит дело в том случае, если, вследствие предварительного износа, неудовлетворительного качества пули и т. д., получает место усиленный прорыв газов. Тогда температура в месте соприкосновения пули со стенкой канала резко поднимается, в результате чего происходит значительное возрастание износа. Таким образом, развитие износа, находящееся в тесной связи со степенью обтюрации, получает скачкообразное усиление.

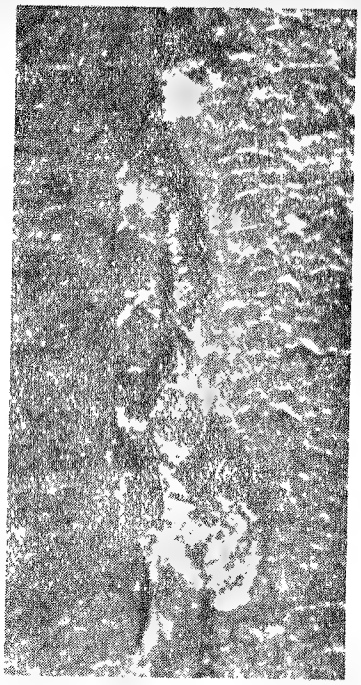


Рис. 46. Оплавления металла, образовавшиеся на участках местных выкрашиваний вблизи начала нарезов в пулеметном стволе

Ув. 10, ум. на $^3/_5$

6. Охлаждение ствола

При каждом выстреле ствол поглощает определенное количество теплоты, которое тем больше, чем выше температура газов и чем большая масса последних принимает участие в теплообмене. Во время промежутков между выстрелами, в силу теплопроводности, происходит выравнивание температуры по толщине стенки ствола. При стрельбе из пулеметов обычная скорострельность (ок. 500 выстрелов в минуту) не препятствует значительному, хотя и не вполне завершенному температурному выравниванию. Часть поглощенного стволом тепла уходит в окружающую среду, а остальное количество тепла идет на повышение температуры ствола. Количество тепла, отдаваемого во вне, возрастает с повышением температуры нагрева ствола и оно

может быть приближенно принято пропорциональным разности температур ствола и окружающей среды. Таким образом, тепловое равновесие наступит только тогда, когда температура ствола окажется настолько высокой, что, в промежутке времени между двумя выстрелами, в окружающую среду будет отдано такое же количество тепла, какое поглощается стволом в момент выстрела*. Следовательно, температура нагрева ствола зависит от скорости ведения огня, от отдающей тепло наружной поверхности ствола и от коэфициента наружной теплоотдачи. При длительном ведении скорого огня из магазинной винтовки значение этой температуры достигает 200° и выше. При этом наблюдается поразительное явление, заключающееся в том, что, как правило, температура дульной части ствола выше, чем температура утолщенной казенной части. Это явление должно быть поставлено в связь с условиями проводимости тепла, а отчасти также с влиянием вихреобразований при выходе пороховых газов в атмосферу вслед за вылетом пули.

Теплоотдача наружу находится в зависимости от размеров, формы и состояния наружной поверхности ствола, а в особенности от свойств окружающей ствол среды. Наиболее действительным является находящее большое применение в ряде образцов пулеметных стволов водяное охлаждение. При средней температурной разности между стволом и охлаждающей средой в 100 — 110°, вода отнимает почти в 200 раз большее количество тепла, чем спокойный воздух. Водяное охлаждение значительно превосходит, таким образом, воздушное охлаждение любой системы.

Однако, в силу известных своих недостатков, водяное охлаждение не всегда применимо для пулеметных стволов. Интенсивность воздушного охлаждения может быть повышена посредством возможно большего увеличения поверхности ствола, отдающей тепло, и путем создания воздушного потока. Застоя воздуха следует безусловно избегать. Ввиду того, что при воздушном охлаждении отдача тепла происходит не только за счет проводимости, но и, главным образом, путем излучения, следует принимать меры к тому, чтобы наружная поверхность ствола обладала высокой излучающей способностью. Этому требованию удовлетворяют вороненые стволы. Отрицательное влияние оказывает полировка или, например, такое покрытие как хромирование. Применение таких вредных в теплотехническом отношении обработок наружной поверхности стволов воспре-

---

* Справедливость этого положения ограничена лишь случаем равномерного темпа стрельбы. (*Примеч. ред.*).

щается и из других соображений (увеличение видимости пулеметов и т. д.) При устройстве воздушного охлаждения должно быть предусмотрено, следовательно, наличие большой, хорошо оксидированной или вороненой наружной поверхности и создание воздушного потока. Несмотря на это, воздушное охлаждение никогда не достигает интенсивности хорошего водяного охлаждения, потому что необходимые для этого — величина наружной поверхности и скорость движения охлаждающего воздуха не могут быть согласованы с требованиями надлежащей компактности и формы пулемета. Это обстоятельство следует всегда иметь в виду при устройстве воздушного охлаждения.

7. Материал для изготовления стволов стрелкового оружия

Высокое давление пороховых газов вызывает необходимость применения ствольной стали с высоким пределом текучести. Для винтовочных и пулеметных стволов, стреляющих остроконечной пулей при давлениях от 3000 до 3300 *кг/см*^{2}, в большинстве стран применяется сталь, обладающая пределом текучести по меньшей мере от 50 до 55 *кг/мм*^{2} и сопротивлением разрыву от 70 до 90 *кг/мм*^{2} при удлинении в 12 — 15%. Эти требования без труда могут быть удовлетворены обыкновенной углеродистой сталью, содержащей 0,6 — 0,7% углерода и 0,5 — 0,7% марганца. Фирма Бёлер-Капфенберг применяет вольфрамовую сталь, содержащую ок. 0,65% углерода и 2% вольфрама и подвергаемую операции улучшения (закалка от 900° и отпуск при 500 — 600°). Механические свойства указанных сталей являются вполне достаточными в отношении сопротивления давлению газов. Но вопрос о стойкости против износа требует особого рассмотрения.

Сопротивление износу возрастает, вообще говоря, с повышением предела текучести. Однако не только это одно свойство имеет главное значение. Совершенно особое место в отношении износа занимают способность к упрочнению и структурное состояние. В связи с этим поучительное значение имеют, например, опыты, произведенные с целью определения зависимости сопротивления сверлению от химического состава и структуры стали [39]. Эти опыты ясно показали, что обрабатываемость стали резанием зависит не только от предела текучести и сопротивления разрыву, но и от способности к упрочнению, от поперечного сужения, от разности между значениями действительного сопротивления разрыву и предела текучести и от структурного состояния.

[39] *W. Schwinning* u. *G. Gutberlet*. Masch.-Bau 10 (1931), S. 178.

Полученные в указанных опытах зависимости, разумеется, не могут быть перенесены в непосредственном виде на соотношения, связанные с износом. Но подобным же образом обстоит дело и с другими опытами по сопротивлению износу. Так, например, известно, что аустенитная марганцовая сталь (1% C и 10—14% Mn) при сопротивлении разрыву ок. 65 *кг/мм*^{2} и низком пределе текучести (порядка 40 *кг/мм*^{2}) обладает исключительной стойкостью против износа, вследствие очень высокой вязкости и особого структурного состояния. Обработка подобной стали режущим инструментом удается лишь с большим трудом.

Итак, наряду с пределом текучести и сопротивлением разрыву, решающее влияние на сопротивление износу имеют вязкость, способность к упрочнению и структурное состояние, — но эти явления до настоящего времени еще не получили научно-обоснованного объяснения.

Сказанному соответствуют также известные автору опыты по отстрелу стволов на живучесть. Испытаниям стрельбой были подвергнуты стволы, изготовленные из углеродистой стали двух сортов. Одна сталь с содержанием 0,65% углерода имела сопротивление разрыву ок. 92 *кг/мм*^{2}, предел текучести 61 *кг/мм*^{2} и удлинение 15%. Вторая сталь, с несколько пониженным содержанием углерода, в результате особой обработки получила сопротивление разрыву 99 *кг/мм*^{2}, предел текучести 81 *кг/мм*^{2} и удлинение 13%. Взятые для испытаний стволы относились к винтовке одной и той же системы. Отстрел производился одинаковыми пулями, режим огня и уход за стволами во время испытаний были также одинаковы. Ствол из первой стали выдержал 15000, а из второй стали — только 5500 выстрелов, т. е. живучесть второго ствола, несмотря на более высокий предел текучести стали, составила лишь 37% живучести первого. Полученные результаты показывают, что предел текучести и сопротивление разрыву сами по себе не имеют решающего значения, — в особенности, если предел текучести искусственно повышен путем холодной обработки. Быть может, имеет значение только предел текучести естественный, т. е. отвечающий термически обработанному материалу, нормально охлажденному или улучшенному, но не подвергнутому холодной обработке давлением. Во всяком случае, ствольная сталь должна обладать еще достаточно хорошей способностью к упрочнению.

Очень большое значение имеет чистота металла в отношении фосфора и серы, а в особенности от газов (кислорода в первую очередь), мелких включений и т. д. Все эти примеси, неуловимые к сожалению при анализе, способствуют образованию мелких задирин (Späne) и их отрыву от поверхности канала. Это не может быть выявлено

при испытаниях на разрыв, так как речь идет о микроскопически малых частицах металла. Поэтому автор придает большое значение особо тщательному раскислению стали, ее чистоте и возможно полному удалению газов.

Незаменимым способом окончательной оценки ствольной стали являются испытания стрельбой, так как научно обоснованное объяснение процесса износа страдает еще пробелами. Но нужно полагать, что для предварительного выбора стали могут быть применены надлежащим образом поставленные, лабораторные испытания на износ.

Приведенные соображения относятся, главным образом, только к винтовочным стволам, нагревающимся при стрельбе не выше 200°, и к пулеметным стволам, снабженным водяным охлаждением. Вопрос о пулеметных стволах с воздушным охлаждением и о таких стволах автоматического оружия, которые подвергаются при стрельбе более значительному нагреву, должен быть рассмотрен особо.

Температура нагрева стенок пулеметных стволов с воздушным охлаждением может достигать 400 — 700°.

Вышеизложенные положения, относящиеся к сопротивлению износу, в основном сохраняют свою силу и в данном случае. Предел текучести, способность к упрочнению и микроструктура оказывают свое влияние и при высоких температурах. Предел текучести всех металлов падает с повышением температуры. На рис. 47 показаны по Рису[40] графики падения предела текучести и сопротивления разрыву легированных и нелегированных сталей с повышением температуры испытания до 800°. Для всех этих сталей падение предела текучести в общем имеет подобный характер. Но по относительному падению предела текучести (в процентах) хромоникелевые стали ведут себя несколько лучше, чем углеродистые. Для того, чтобы предел текучести обладал требуемой величиной при заданной температуре нагрева, необходимо за счет легирования и получения надлежащего структурного состояния повысить предел текучести при комнатной температуре настолько, чтобы в условиях высокой температуры он сохранил еще нужное значение. Применение для этой цели холодной обработки металла не может дать существенного улучшения, так как при нагреве свыше 400° происходит либо частичное, либо полное уничтожение достигнутого при комнатной температуре повышения предела текучести.

В отношении повышения величины предела текучести при комнатной температуре ограничение возникает со стороны возможности обработки металла резанием. При изго-

---

[40] Nickelhandbuch, Werkzeugstähle, S. 4, Nickel. Informationsbüro, Frankfurt a. M.

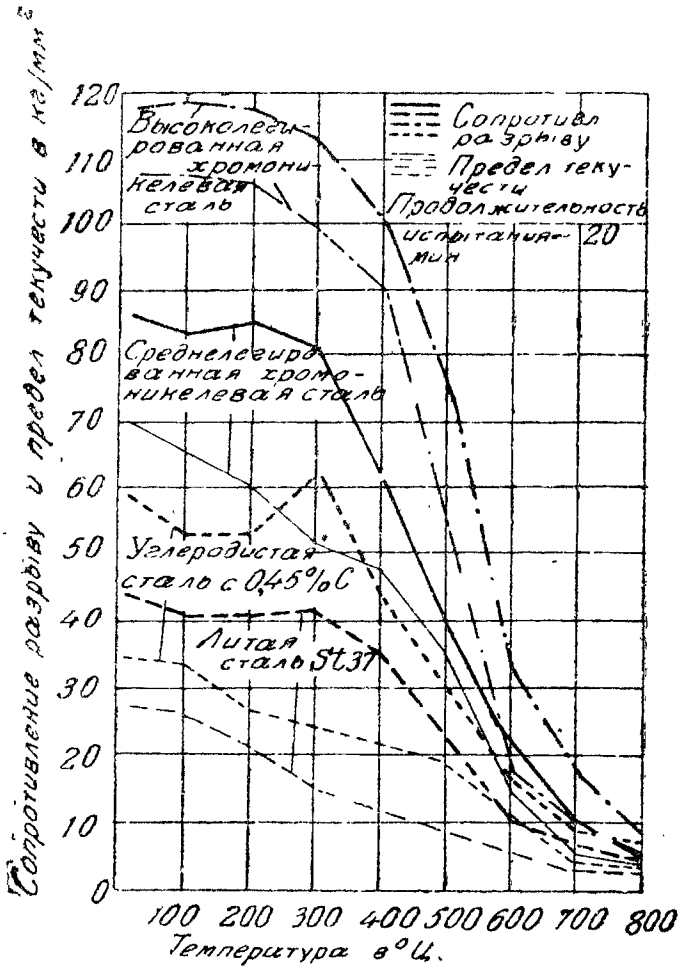


Рис. 47. Влияние высоких температур нагрева на сопротивление разрыву и предел текучести различных сталей

(По Рису)

товлении ствола должна быть обеспечена не вызывающая особых затруднений наружная обточка, а в особенности— расточка канала. Тем более поэтому следует стремиться к изысканию таких сортов стали, которые отличаются малым падением предела текучести при повышении температуры. Подобные сорта следует искать среди сталей для клапанов. Этот вопрос относится к неразработанной еще до сих пор области металлургии.

Но предел текучести и при высоких температурах не является единственным свойством, определяющим процесс износа; способность к упрочнению, структура и т. д. сохраняют свое значение также и в данном случае. В отношении изменения стойкости стали против износа с повышением температуры еще не имеется никаких научно-исследовательских работ. Проведение последних является весьма желательным, тем более, что они могут способствовать продвижению и других вопросов (стали для клапанов и т. п.).

Испытания на разрыв при высоких температурах могут дать, следовательно, указания для предварительного выбора сталей для пулеметных стволов, но окончательное выяснение вопроса о действительном поведении этих ста-

лей может быть получено лишь путем отстрела на живучесть. Вообще же следует иметь в виду, что при очень высоких температурах (600 — 700° и выше) предел текучести всех сталей значительно падает. Правда, стали типа быстрорежущих выдерживают и более высокие температуры, но они никоим образом не могут рассматриваться, как метериал для изготовления стволов огнестрельного оружия.

Возрастание износа с повышением температуры не пропорционально последней, а при некотором определенном значении ее (различном для разных сталей) происходит особенно значительное его ускорение.

В отношении целесообразного подхода к выбору пули также весьма важное значение имеет вопрос о возможно лучшем охлаждении ствола.

В. Износ орудийных стволов

1. Явления разрушения поверхности канала

В орудийных стволах имеют место также уже известные явления разрушения канала в виде истирания, образования трещин и вымывания металла, вследствие эрозии*. Эти явления в большинстве случаев протекают одновременно, перекрывая друг друга. Несмотря на одинаковость причин разрушения канала, рассматриваемые явления по своему характеру различны, причем наблюдаемые различия особенно сильно зависят от способа ведения снаряда и от влияний, связанных с очень крупными калибрами.

В орудийных стволах малых и средних калибров, как правило, наблюдается сетка трещин на полях и нарезах (см. рис. 48—52). Она проявляется в наиболее ярко выраженной форме на протяжении канала от начала нарезки до места наибольшего давления газов; по направлению к дулу развитие трещин уменьшается. Как правило, в наиболее сильной степени подвергается разрушению начало нарезной части. В более слабой форме наблюдается сетка трещин также и в каморе, но только в передней ее части, не защищенной гильзой.

В начале нарезной части сетка трещин часто приводит к выкрашиваниям частиц металла (рис. 53 и 56), а также к местным выколам полей (рис. 55). Кроме этого вида разрушения, поля нарезки на рассматриваемом участке подвергаются более или менее сильному истиранию. Вследствие этого происходит их сглаживание, закругление ребер и они становятся мало пригодными к ведению снаряда (рис. 54,

* См. сноску на стр. 149.

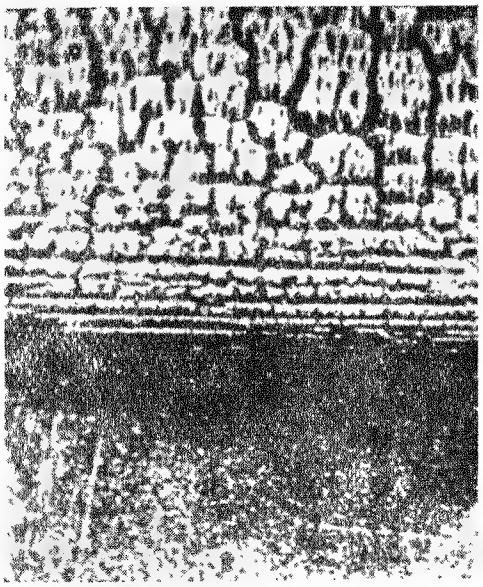


Рис. 48

Рис. 49

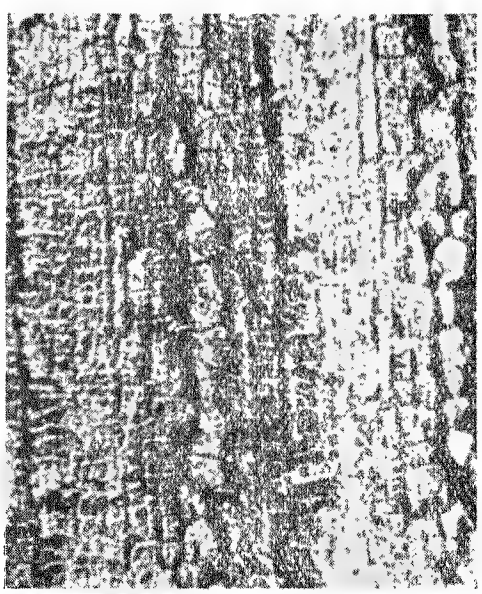


Рис. 50

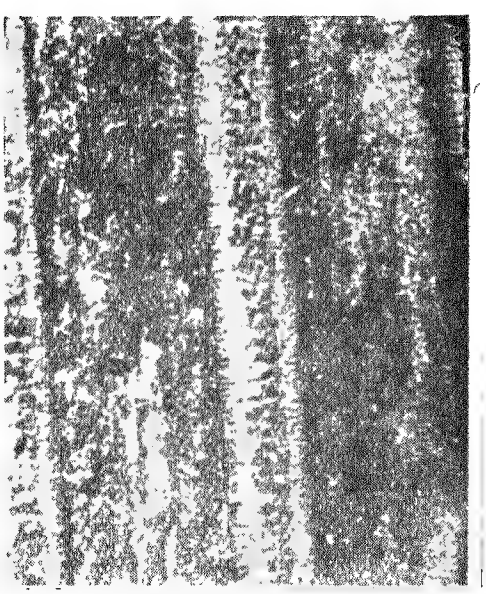


Рис. 51

Рис. 48—51. Сетка трещин в стволе 8,8-*см* пушки высокой мощности. Направление стрельбы снизу вверх. Ув. 5, ум. на $^3/_5$

Рис. 48. Сетка трещин и эрозия в переходном конусе

Рис. 49. Сетка трещин в расстоянии 100 *мм* от начала нарезов

Рис. 50 Сетка трещин в расстоянии 200 *мм* от начала нарезов. Тонкое строение сетки. Различие между полями и нарезами

Рис. 51. Сетка трещин в 500 *мм* от начала нарезов. Сетка выражена слабо и перекрыта отложениями материала ведущего пояска

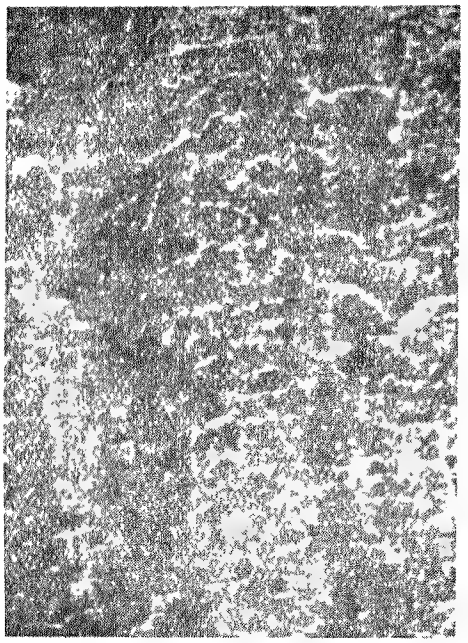


Рис. 52. Сетка трещин в 10,5-*см* стволе на удалении 50-*мм* от начала нарезов

Ув. 5, ум. на $^{3}/_{5}$

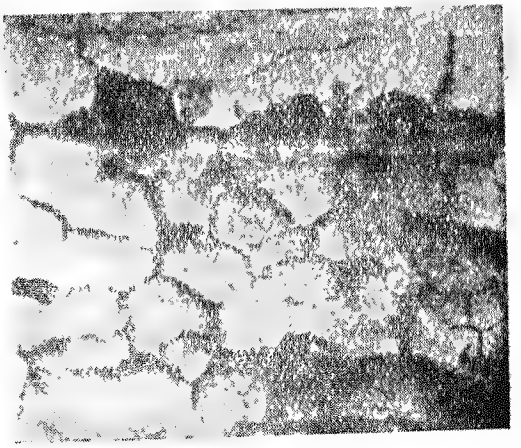


Рис. 53. Первичная сетка трещин и выкрашивания на дне нареза

Ув. 9, ум. на $^{3}/_{5}$

Рис. 54. Сетка трещин в стволе 8,8-*см* пушки высокой мощности. Направление стрельбы слева направо

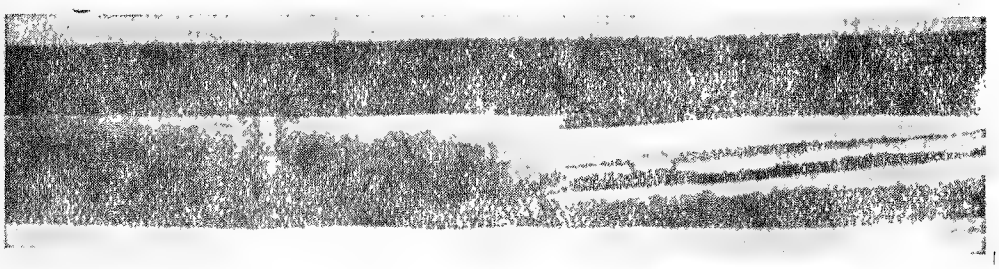


Рис. 55. Частичные выколы полей, кольцеобразная эрозия и сетка трещин в месте, отвечающем срезу гильзы. Направление стрельбы слева направо

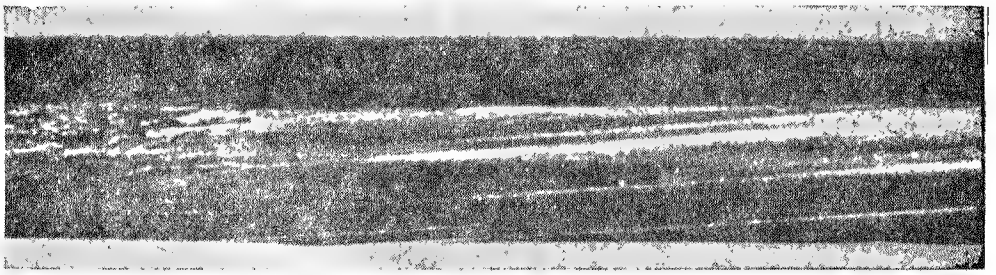


Рис. 56. Выгорание канала ствола полевой пушки 96 п/А. Направление стрельбы слева направо

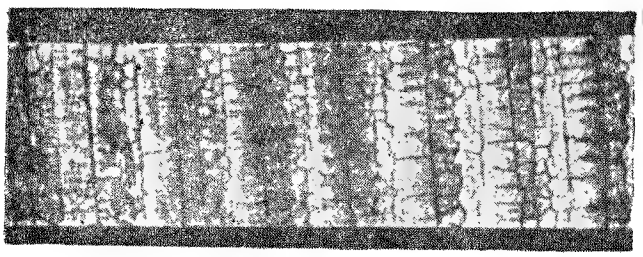


Рис. 57. Развитие трещин (первичная сетка) и истирание полей. Направление стрельбы снизу вверх

57). По направлению к дульному срезу истирание постепенно уменьшается и у дульного среза поля нарезки даже в сильно изношенных стволах достаточно хорошо сохраняются, — в противоположность винтовочным стволам, в которых и у дульного среза часто наблюдается полное сглаживание нарезки. В случае сильного развития износа канала, в начале нарезной части происходит, как явление вторичного порядка, поверхностная эрозия металла на участках, углубленных вследствие предшествовавшего процесса местного выкрашивания (рис. 58 и 59).

В крупнокалиберных орудиях большой мощности наблюдаются или указанные явления с сильным возрастанием эрозионного воздействия, или последнее становится явлением первичного порядка и служит основной причиной износа канала (рис. 60).

Значительное разрушение полей в начале нарезной части приводит к увеличению длины пороховой каморы. Это удлинение каморы в крупнокалиберных стволах большой мощности достигает 0,5 *м* и более. Снаряды при раздельном заряжании продвигаются поэтому дальше вперед и происходит ухудшение обтюрации. В орудиях, снабженных унитарным патроном, при выстреле имеет место сильный удар снаряда в начало нарезной части, вследствие чего весьма значительно возрастают усилия, действующие на поля и ведущий поясок. Начальная скорость постепенно падает, а рассеивание ее отдельных значений увеличивается. В мощных, крупнокалиберных орудиях уже в самом начале развития явлений разрушения канала наблюдается

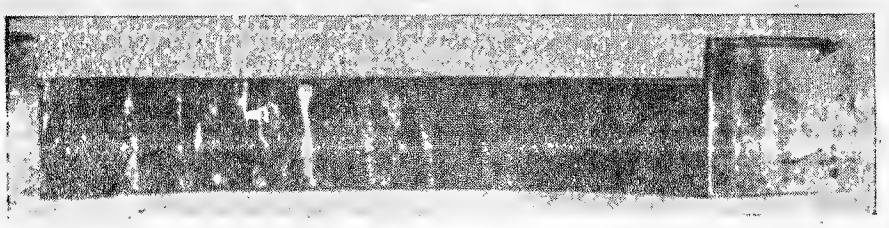


Рис. 58. Сетка трещин с одновременным проявлением эрозии, происшедшей в местах выкрашивания

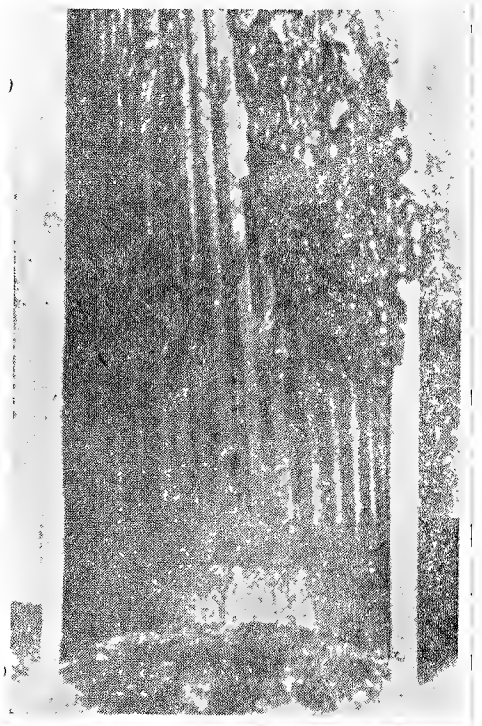


Рис. 59. Сильно выраженные разрушения, вызванные эрозией, в свою очередь обусловленной предшествующим процессом выкрашивания. Направление стрельбы снизу вверх

от выстрела к выстрелу увеличение длины каморы и падение начальной скорости.

Разрушение полей в начале нарезной части постепенно приводит к исключению возможности правильного ведения снаряда по нарезам. Последний перестает следить за винтовой линией нарезки и „проскакивает" над отдельными полями. В связи с этим, ведущий поясок в той или иной мере стирается и рассеивание снарядов становится недопустимо большим.

Рис. 60. Эрозионные повреждения без развития первичной сетки трещин в сильно изношенном крупнокалиберном стволе крупповской опытной пушки высокой мощности. Направление стрельбы снизу вверх

Ув. 1,5, ум. на $^3/_5$

2. Металлографическое исследование

Трещины, представляющие собою результат хрупкого разрушения поверхности канала, как правило, нормальны к последней и имеют глубину от нескольких десятых миллиметра (в отдельных случаях от нескольких сотых миллиметра) до 1—2 *мм* (рис. 61). В случае большой глубины они разветвляются и часто соединяются, образуя местные выкрашивания металла (рис. 62 и 63). По ориентировке одна группа трещин развивается в направлении, параллельном наклону нарезки, а другая группа — в направлении, поперечном по отношению к производящей канала. Сочетание тех и других трещин дает сетку неправильной формы. Особенно глубокие трещины наблюдаются чаще всего в основании поля. Они начинаются от обеих граней, проходят вглубь металла под некоторым углом (рис. 64 и 65) и, при соответствующем увеличении глубины, приводят к выколу поля на большем или меньшем протяжении. В большинстве случаев наибольшую глубину имеет трещина, примыкающая к холостой грани* (рис. 65).

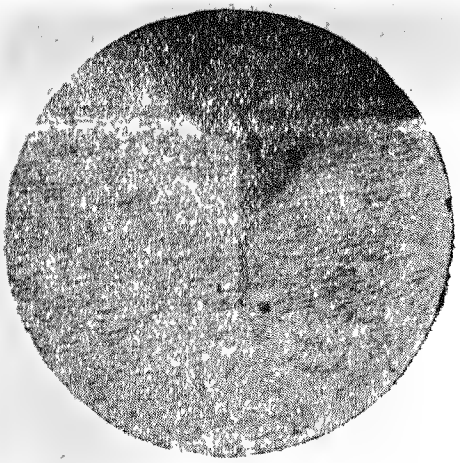
Детальное исследование большого числа шлифов, взятых из орудийных стволов обыкновенной хромо-никелевой стали, а также из винтовочных стволов, показало, что какого-либо изменения структуры металла в местах, характеризующихся наличием трещин, не наблюдается. При изготовлении этих шлифов были приняты особые меры для избежания завалки краев, служивших предметом исследования. Точно так же не было выявлено при исследовании признаков обогащения поверхностного слоя канала азотом (т. е. азотистых образований)[41]. Если в отдельных случаях и наблюдались места, характеризовавшиеся наличием слабо выраженных азотистых образований, то они оказывались равномерно распределенными по всей толщине образца. Следовательно, причиной их возникновения послужили металлургические процессы, а не действие пороховых газов. Не было обнаружено также обезуглероживания поверхностного слоя. Структура металла исследованных объектов, представлявшего собою улучшенную сталь, была более или менее дисперсным, иногда троститообразным, сорбитом, который сохранялся без изменения до краев трещин.

Были произведены также детальные испытания большого числа шлифов на твердость посредством прибора Мартенса (с алмазным наконечником, при постоянной нагрузке), при-

---

* См. сноску на стр. 148. (*Прим. ред.*).

[41] При металлографическом исследовании на азотистые образования был применен способ травления по *Henstenberg* u. *Bornefeld*, испытанный предварительно в применении к азотированной стали. Этот способ описан в Kruppsche Mh. Bd. 11 (1930), S. 265.



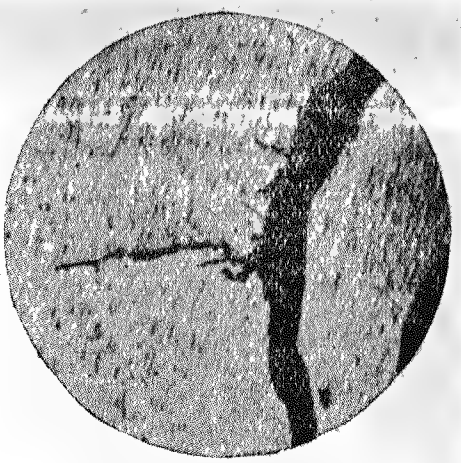
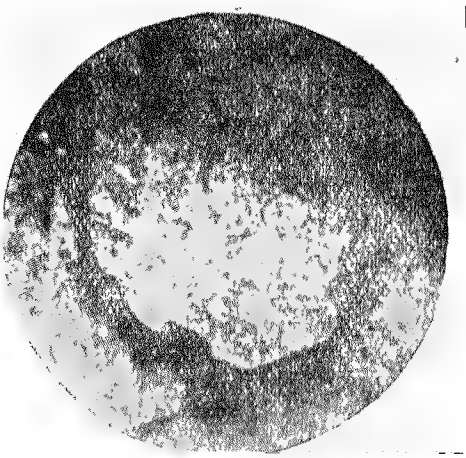


Рис. 61. Трещина, вызванная наличием микроскопического включения
Ув. 100, ум. на 3/5

Рис. 62. Разветвление трещины вследствие влияния включений
Ув. 100, ум. на 3/5

Рис. 63. Залегание меди в глубокой трещине. Пример, показывающий влияние трещин на выкрашивание частиц металла (шлиф поперечный)
Ув. 100, ум. на 3/5



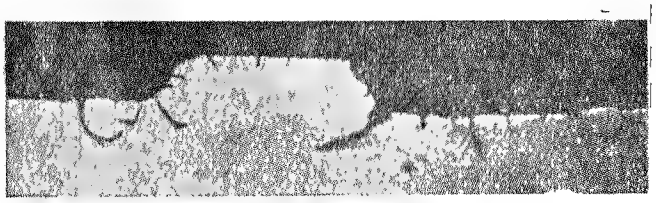


Рис. 64. Трещины, расположенные в углах нарезки и приводящие к выколу поля. Шлиф поперечный
Ув. 9, ум. на 3/5

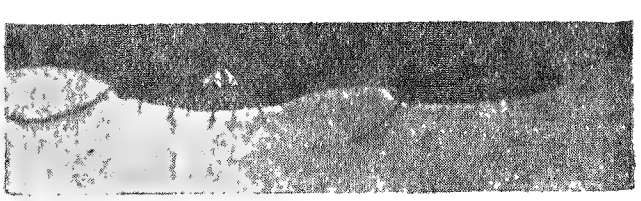


Рис. 65. Трещины в углах нарезки. Более сильно развитая трещина находится со стороны холостой грани
Ув. 5, ум. на 3/5

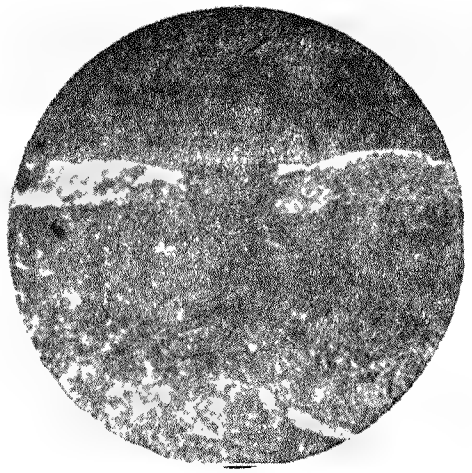


Рис. 66. Трещины в местах разрушения от эрозии. Вместе с тем видно изменение структуры

Шлиф поперечный, травлен пикриновой кислотой
Ув. 100, ум. на $^3/_5$

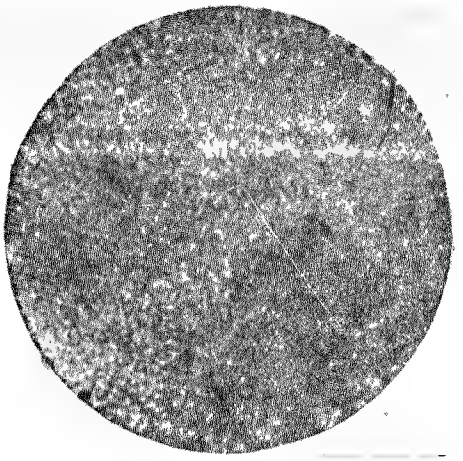


Рис. 67. Доказательство мартенситного строения стали в местах, подвергшихся разрушению от эрозии (рис. 66)

Травление в пикриновой кислоте
Ув. 1500, ум. на $^3/_5$

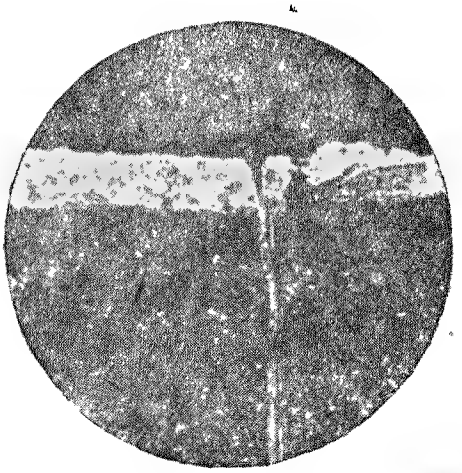


Рис. 68. Изменение структуры поверхностного слоя в местах разрушения от эрозии (поперечный шлиф). Доказательство повышения твердости этого слоя методом царапания

Ув. 100, ум. на $^3/_5$

чем полученные царапины подвергались измерению по ширине. Какого-либо изменения твердости на участках, прилегающих к трещинам, а также в поверхностном слое канала, обнаружено не было во всех тех случаях, когда не имело место явление эрозии. Это относится как к орудийным, так и к винтовочным стволам.

Совершенно иные результаты были получены при исследовании участков канала, подвергшихся горячей газовой эрозии. Этот вид разрушения канала иногда совпадал с развитием сетки трещин (рис. 58), а иногда наблюдался, как явление первичного порядка, независимо от образования трещин (рис. 60). Во всех случаях наличие местной эрозии оказывалось связанным со значительным изменением металла поверхностного слоя на глубину до нескольких

десятых миллиметра. Как видно из рис. 66 и 67, этот слой имеет структуру мартенсита. Кроме того, в местах поверхности канала, подвергшихся наиболее сильной эрозии, в большинстве случаев можно было наблюдать еще другой чрезвычайно тонкий слой едва измеримой глубины, расположенный у самой поверхности и отличающийся по своей структуре от указанного мартенситного слоя. Строение этого крайнего слоя и его отношение к различным травящим реактивам позволяют предположить, что он представляет собою тонкую, шлакообразную пленку окисла. Этому предположению соответствует и результат испытания на твердость. В то время как в мартенситном слое ширина царапины претерпевает резкое сужение (рис. 68), отвечающее значительному повышению твердости этого закаленного слоя,—крайний слой, в противоположность этому, характеризуется низкой твердостью.

3. Образование трещин

Из металлографического исследования трещин следует, что они являются результатом ярко выраженного хрупкого разрушения материала, обладающего свойством нормальной вязкости. Следовательно, причиной, вызвавшей этот вид разрушения, могли послужить только переменные напряжения усталости, которые способны привести к типичному хрупкому излому даже самый вязкий материал[42]. Так как трещины образуются только в тонком слое и не получают дальнейшего значительного развития вглубь стенки, то следует считать, что действие указанных напряжений растяжения — сжатия ограничивается только этим слоем.

В отношении образования трещин или излома в результате действия напряжений переменного знака имеют место следующие общие положения.

Предел усталости стали, определенный как предельное напряжение, отвечающее числу циклов, превосходящему 10 миллионов, составляет ок. $^1/_2$ сопротивления разрыву ($\pm 10\%$) и в большинстве случаев оказывается ниже предела текучести. С уменьшением числа циклов до разрушения металла предельное напряжение цикла возрастает. Опытные данные, полученные в Институте металлургии и металловедения при Дрезденской высшей технической школе для 20-*мм* круглых образцов из стали St 37, приводятся в таблице 11 и на рис. 69.

Однако увеличение предела усталости не может быть достигнуто произвольным образом за счет только повыше-

[42] Ср., напр., рис. 15, 16 и 21 в работе *W. Schwinning* u. *K. Strobel.*— Z. Metallkde. 22 (1930), S. 402.

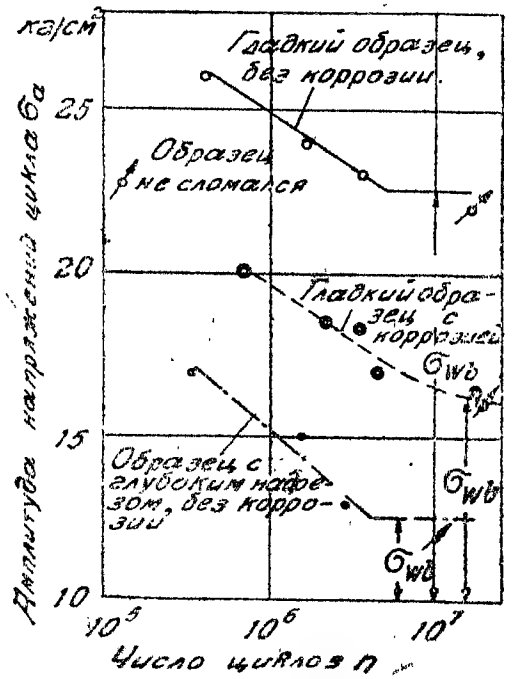


Рис. 69. Испытания с целью определения предела усталости на изгиб σ_{Wb} для стали St 37.

Таблица 11. Механические свойства катанной стали St 37 (диаметром 20 *мм*), определенные при испытании на разрыв при 20° С (средн. значения)

Сопротивл. разрыву.	σ_B	= 40,7 *кг/мм²*
Предел текучести: верхний.	σ_{S_o}	= 28,2 „
Предел текучести: нижний .	σ_{Su}	= 27,7 „
Относит. удлинение.	δ_{10}	= 30,9 %
Относит. поперечн. сужение	ψ	= 72,0 %

Сопротивление усталости на изгиб σ_{Wb} при 20°

Число циклов	Гладкие образцы без коррозионного воздействия	Гладкие образцы с коррозионным воздействием капель проточной воды	Глубоко надрезанные образцы без коррозионного воздействия
	Предельные напряжения цикла в *кг/мм²*		
10^5	28,2	23,0	19,5
10^6	24,9	19,7	15,2
$10^7 = \sigma_{Wb}$	22,5	16,2	12,5

ния предела текучести. Примером этому может служить сталь St C 60.61, в которой путем соответствующего способа улучшения (термообработки) предел текучести был повышен до 0,75 от сопротивления разрыву (см. таблицу 12 и рис. 70). Несмотря на это предел усталости на изгиб составил всего ок. $^1/_2$ сопротивления разрыву. И только предельное напряжение цикла, отвечающее 100000 циклам, оказалось почти равным пределу текучести.

Предел усталости (предельное напряжение цикла) значительно понижается во всех случаях, когда одновременно с приложением переменных усилий имеет место коррозионное воздействие. Это явление, впервые наблюденное Mc. Adam[43], было подтверждено в дальнейшем работами многих других авторов.

[43] *Mc Adam.* Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 26 II (1926) S. 224.—*O. Graf.* Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe. S. 71. Springer: Berlin 1929.

Рис. 70. Испытания с целью определения предела усталости на изгиб σ_{Wb} для стали St C 60.61

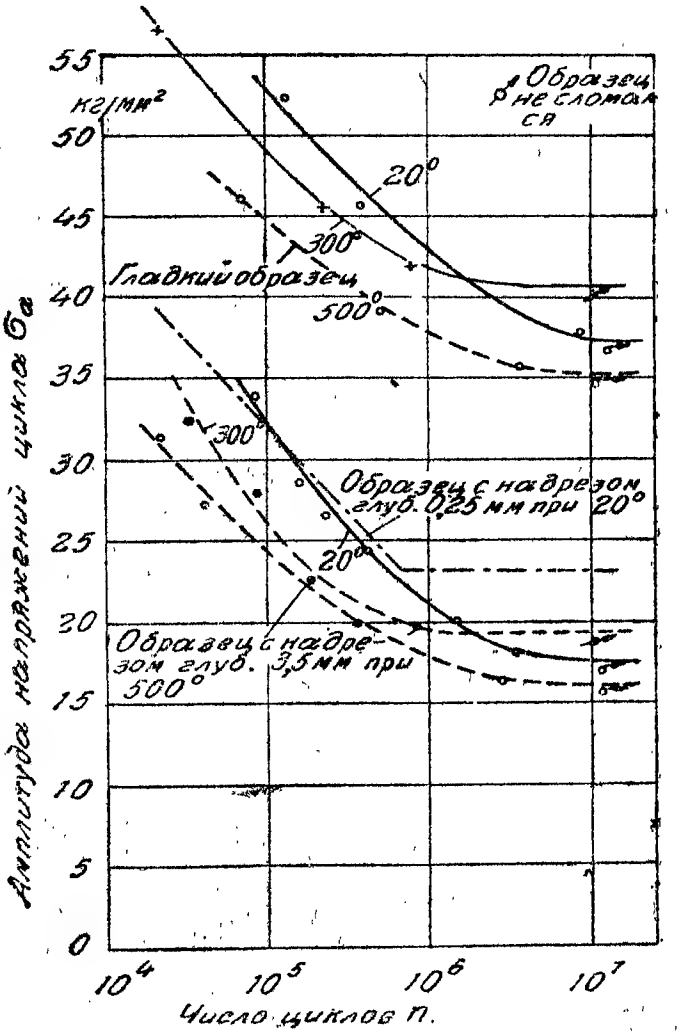


Таблица 12. Механические свойства кованной и улучшенной стали St C 60.61 (круглый образец диаметром 17 *мм*), определенные при испытании на разрыв при 20° (средн. значения)

Сопротивл. разрыву	σ_B	=72,3 *кг/мм²*
Предел текучести	σ_S	=54,4 „
Удлинение при разр.	δ_{10}	=20,0 %
Удлинение при разр.	δ_5	=27,0 %
Поперечн. сужение	ψ	=61,0 %

Сопротивление усталости на изгиб при 20°, 300° и 500°

Число циклов	Образцы гладкие без коррозионного воздействия при:			Образцы надрезанные без коррозионного воздействия при:		
	20°	300°	500°	20°	300°	500°
	Предельные напряжения цикла в *кг/мм²*					
10^5	53,0	49,0	45,0	32,3	26,0	24,4
10^6	42,7	41,8	37,6	20,4	19,6	17,7
$10^7=\sigma_{Wb}$	37,4	40,7	35,3	17,5	19,4	16,0

Вышеуказанная сталь St 37 была подвергнута испытаниям на усталость с одновременным коррозионным воздействием, которое осуществлялось путем непрерывного падения капель чистой проточной воды на образец во время производства испытания. По внешнему виду образца следы коррозии были едва заметны; точно так же ржавление образца практически еще не наступило. Несмотря на это, предел усталости понизился, как это видно из таблицы 11 и рис. 69, примерно на 30—40%. Таким образом даже очень

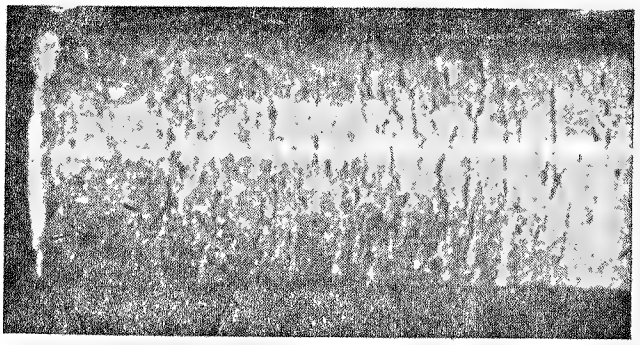


Рис. 71. Сетка трещин, полученная на стальном образце в результате испытания на усталость при одновременном коррозионном воздействии проточной воды

Трещины выявлены посредством травления в соляной кислоте
Ув. 7, ум. на $^3/_5$

слабое коррозионное воздействие, внешне почти совсем себя не проявившее, произвело сильное уменьшение предела усталости.

На поверхности образцов, подвергавшихся коррозионному воздействию, после испытания на усталость была обнаружена сетка многочисленных тонких трещин (рис. 71), в то время как образцы, испытанные без коррозионного воздействия, никаких поверхностных дефектов не показали.

В случае более сильного коррозионного воздействия, например, морской водой, сопротивление усталости, — как это показали опыты Майлендера, Лудвика, Лера и друг. авторов, — понижается еще более значительно, убывая с увеличением продолжительности этого воздействия. Различные коррозионные среды действуют различным образом и можно считать, что главную опасность представляет тот случай, когда происходит интеркристаллитная коррозия. Весьма силь-

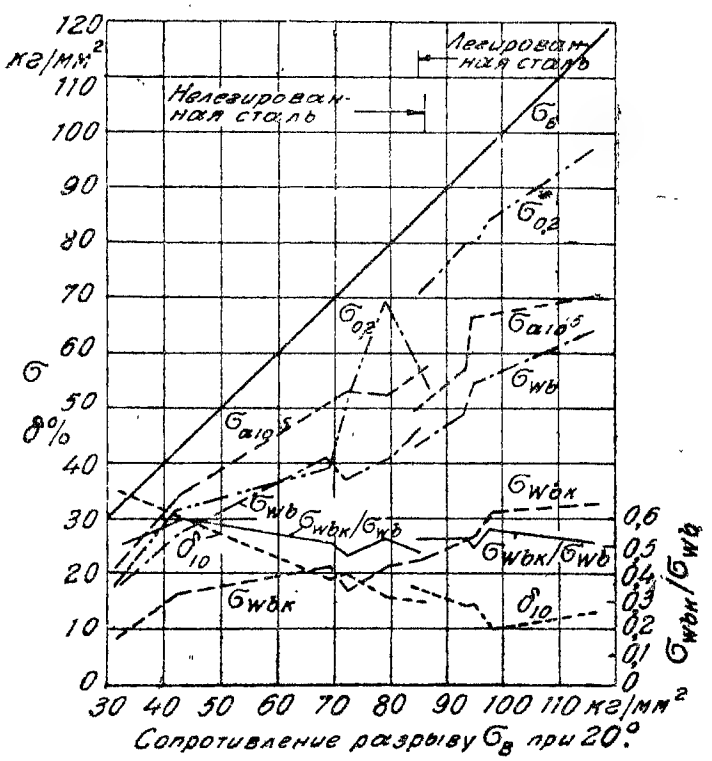


Рис. 72, 73, 74. Влияние температуры на механические свойства сталей с различным сопротивлением разрыву

ное понижение предела усталости вследствие коррозии наступает тогда, когда последняя действует одновременно с приложением переменных усилий. В противоположность этому, если коррозионное воздействие имело место и прекратилось до начала приложения переменных усилий, влияние коррозии на предел усталости оказывается очень слабым, несмотря даже на значительное изменение поверхности образца.

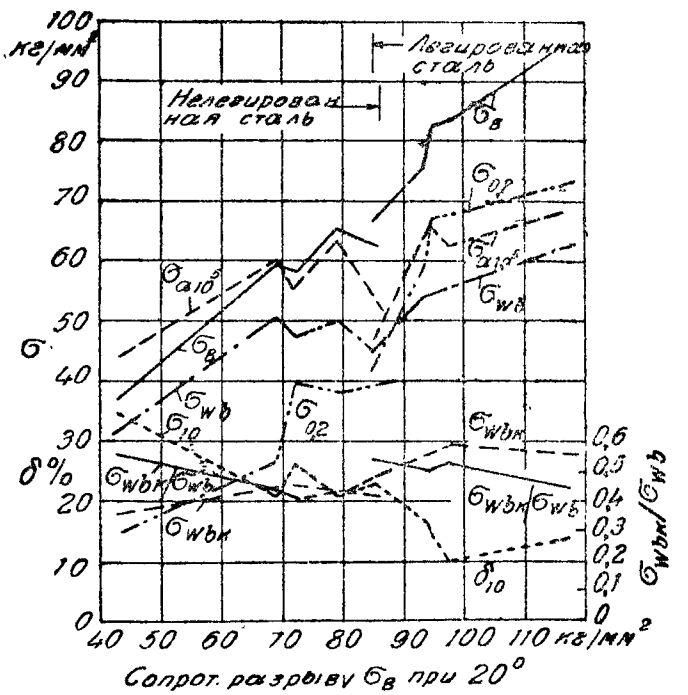


Рис. 73. Для 400°

На диаграммах рис. 72—74 показана зависимость от сопротивления разрыву при 20° следующих механических свойств:

σ_B сопротивления разрыву в *кг/мм²*

$\sigma_{0,2}$ условного предела текучести в *кг/мм²*

δ_{10} удлинения при разрыве в % ($l = 10\,d$)

σ_{Wb} предела усталости на изгиб на основе 10^7 циклов для гладких образцов, в *кг/мм²*

σ_{Wbk} то же, но для образцов с надрезом глубиной 3,5 *мм* (форму образца см. на рис. 75)

σ_{a10^5} предельного напряжения цикла, отвечающего 10^5 циклам в *кг/мм²*

$\frac{\sigma_{Wbk}}{\sigma_{Wb}}$ отношения предела усталости надрезанных образцов к пределу усталости гладких образцов

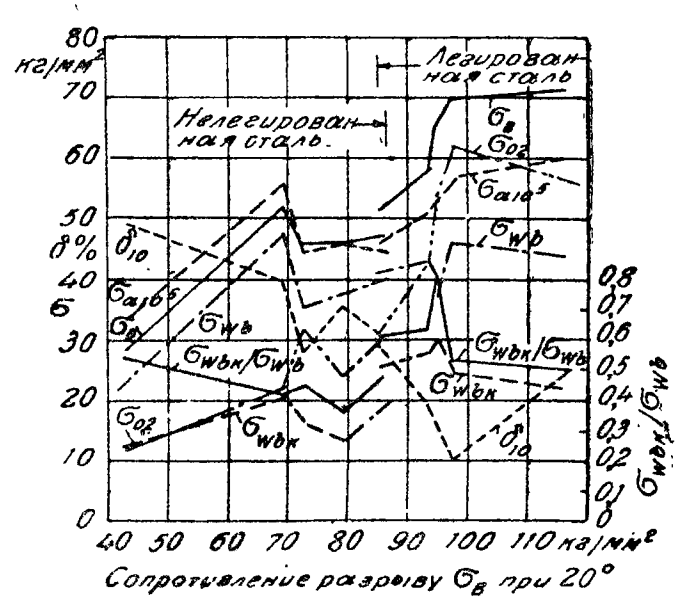


Рис. 74. Для 500°

При температурах выше 200° предел текучести значительно уменьшается. Предел усталости с повышением температуры до 500° понижается в меньшей степени, чем предел текучести. Рис. 72—74 представляют результаты работы автора совместно с д-р инж. Кнохом и д-р инж. Улеманом по испытанию при высоких температурах конструкционных сталей с сопротивлением разрыву от 43 до 117 *кг/мм*^{2}. Эти данные охватывают механические свойства как при статическом испытании на разрыв, так и при испытании на усталость гладких и надрезанных образцов. Численные значения полученных характеристик при 20°, 400° и 500° показаны на диаграммах рис. 72, 73 и 74, на которых по оси абсцисс отложены величины сопротивления разрыву соответствующих сталей при 20°.

При температуре ок. 200° углеродистые стали показывают небольшое понижение, а при температурах 300—400° вновь — повышение предела усталости. При 400° последний имеет почти ту же величину, что и при 20°. И только при температуре выше 400° происходит значительное уменьшение величины предела усталости, которая при этом всегда остается меньше, чем соответствующее значение предела текучести. Нагрев образцов при испытании производился на воздухе. Поэтому следует учитывать, что на полученные результаты оказало влияние окисление поверхности образцов кислородом воздуха, которое при 500° является довольно существенным.

Наличие надрезов заметно снижает предел усталости. При полукруглой форме надреза с большим радиусом снижение составляет от 10 до 15%, а в случае острого надреза это влияние значительно усиливается. Это видно из кривых рис. 75, представляющих значения предельных напряжений цикла для стали St 37 в результате испытаний образцов гладких, с полукруглым надрезом и с острыми надрезами глубиной в 0,25 *мм* и 3,5 *мм*. Значительное понижение сопротивления усталости с увеличением действия надреза характеризуется приведенными кривыми весьма отчетливо.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что влияние глубокого и острого надреза для всех исследованных сталей оказывается примерно одинаковым, что можно видеть из кривых рис. 72, представляющих отношение $\frac{\sigma_{Wbk}}{\sigma_{Wb}}$. Это влияние сводится к снижению предела усталости надрезанных образцов по сравнению с пределом усталости гладких образцов в среднем на 50%. Только при температуре 500°, при которой происходят уже значительные структурные изменения, указанное отношение изменяется существенно и неравномерно для различных сталей. Внутрен-

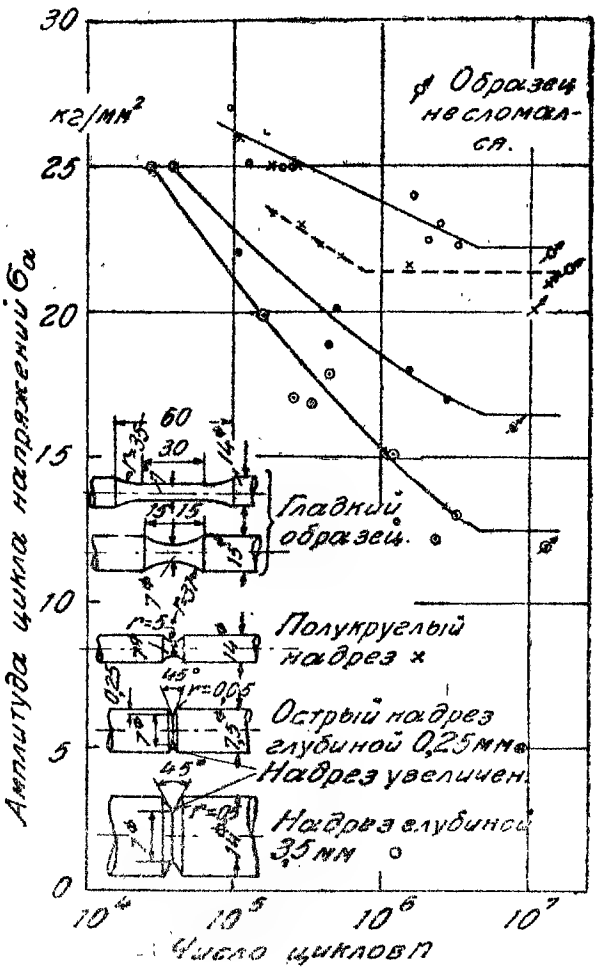


Рис. 75. Результаты испытаний по определению предела усталости на изгиб горячекатанной стали St 37 при различных формах надреза образцов

ние напряжения также сильно влияют на действие надреза, в данном случае в сторону уменьшения. При длительном нагреве при 200—300° происходит уменьшение этих напряжений, а следовательно и падение их влияния (ср. в связи с этим выводы в отношении автофретажа, стр. 76).

В отношении мягких сталей имеет место сильное влияние глубины надреза в случае его остроугольной формы. Для твердых же сталей это влияние становится значительно меньшим, так что действие надрезов глубиной 0,25 *мм* и 3,5 *мм* дает уже близкие результаты. Указанное обстоятельство особенно оправдывается для предельных напряжений, отвечающих небольшим числам циклов, не превосходящим $5 \cdot 10^5$. Как видно, например, из кривых рис. 79, относящихся к стали StC 60.61 с повышенным сопротивлением разрыву, эти предельные напряжения цикла для надрезов глубиной 0,25 *мм* и 3,5 *мм* оказываются почти одинаковыми.

Факт повышенной чувствительности к действию надреза сталей, обладающих высоким сопротивлением разрыву, в отношении мелких поверхностных дефектов находится в соответствии с опытными данными Майлендера и др. авто-

ров [44]. Таким образом, для этих сталей острые надрезы даже незначительной глубины при числе циклов до $5 \cdot 10^5$ приводят почти к тому же снижению сопротивления усталости, что и глубокие надрезы.

Возникновение сетки трещин в стволах огнестрельного оружия обязано повторному действию переменных напряжений. Так как появление этой сетки происходит при числе циклов (числе выстрелов), не превосходящем 5000—10000, то следует полагать, что действующие при этом напряжения значительно превышают предел усталости. Поэтому, кроме напряжений, вызванных давлением газов, здесь должны иметь место еще дополнительные напряжения. Причиной возникновения последних является термический эффект, значение которого впервые было отмечено Черновым. Газовый поток, имеющий очень высокую температуру (температура горения нормального винтовочного пороха ок. 2500°), передает поверхности канала в момент выстрела настолько значительное количество тепла, что наибольшая часть последнего за столь короткий промежуток времени не успевает проникнуть вглубь толщины стенки. Вследствие этого происходит концентрация нагрева в очень тонком поверхностном слое стенки подобно тому, как это имеет место при сварке или автогенной резке металла. В этом случае подвод тепла к поверхности также получается настолько значительным, что оно не может быть отведено за счет теплопроводности металла.

Таким образом, в момент весьма кратковременного теплового воздействия получается распределение тепла, схематически показанное на рис. 76 в виде кривой *a*. Вслед за прекращением этого воздействия происходит последовательное выравнивание температур, согласно кривых *b* и *c*. Выравнивание идет очень быстро и зависит от теплопроводности металла. Чем меньше последняя, тем выше максимальная температура нагрева поверхностного слоя, тем он тоньше и тем более сильный перегрев он получает. С увеличением же теплопроводности металла температура рассматриваемого слоя понижается. Весьма характерной иллюстрацией влияния теплопроводности может служить, например, тот факт, что медь не поддается резке автогенным способом, несмотря на ее относительно низкую температуру плавления, — в то время как значительно более тугоплавкое железо легко разрезается.

Следствием нагрева поверхности канала ствола является тепловое расширение тонкого внутреннего слоя, составляющее 0,1% на 100°. Это расширение служит в свою очередь

---

[44] Ср. *E. Armbruster.* Влияние состояния поверхности на распределение напряжений и предел усталости на изгиб. VDI-Verlag: Berlin 1931.

причиной появления в указанном слое напряжений сжатия, так как остальная масса стенки ствола участия в тепловом расширении не принимает. В случае стали с пределом текучести в 50 *кг/мм*^{2}, напряжение сжатия становится равным пределу текучести уже при нагреве поверхностного слоя, примерно, до 250°. Дальнейшее повышение температуры этого слоя приведет, следовательно, к его пластической деформации (сжатия). Однако этот переход за предел текучести на сжатие еще не вызовет появления трещин. Для образования последних необходимо еще дополнительное влияние

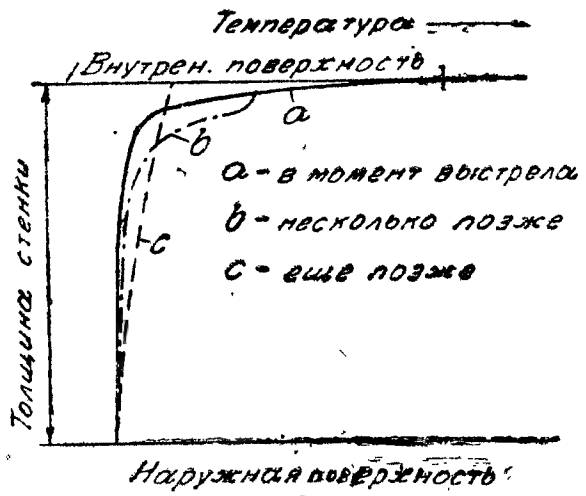


Рис. 76. Распределение температур по толщине стенки ствола

перемены знака напряжений от сжатия к растяжению. Эта перемена происходит вследствие того, что непосредственно после выстрела получает место выравнивание температур. Вследствие этого внутренний слой должен полностью вернуться в исходное положение, т. е. он должен сжаться на величину, соответствующую тепловому расширению. Но так как часть последнего перешла в остаточную деформацию, а наружный толстый слой практически остался неизменным, то во внутреннем поверхностном слое должна возникнуть деформация растяжения на величину, равную полученной ранее остаточной деформации сжатия[45].

Возникающее вследствие этого растягивающее напряжение будет иметь тем большую величину, чем больше было первоначально полученное тепловое расширение. Так, если температура нагрева достигнет 500°, то это напряжение станет равным пределу текучести на растяжение. Поэтому, при достаточном числе повторных циклов нагрева — охлаждения, необходимым следствием должно явиться образование трещин, обязанных действию напряжений переменного знака. К сказанному необходимо добавить, что с повышением температуры происходит падение величины предела теку-

[45] Таким образом получается результат, прямо противоположный тому, который имеет место при автофретаже.

чести, а при температурах свыше 400° — также и предела усталости.

Чем выше температура поверхности канала в момент выстрела, тем значительнее величина интервала между напряжениями растяжения и сжатия и тем скорее, следовательно, должно произойти образование сетки трещин. Так как тепловое расширение происходит как в поперечном по отношению к оси трубы направлении, так и в продольном, то создаются условия для развития трещин в этих обоих направлениях.

Влияние указанных напряжений усиливается за счет дополнительных напряжений, связанных с трением ведущего пояска и, в особенности, с коррозионным воздействием пороховых газов. Возникновение последнего обусловлено химическим составом пороховых газов, причем особо важное значение имеет то обстоятельство, что коррозионный процесс совпадает во времени с действием переменных тепловых напряжений. В наличии коррозионного воздействия можно убедиться путем исследования под микроскопом глубоко залегающих трещин в сильно изношенных стволах.

В этих трещинах наблюдается чередование окисных включений со слоями подвергшегося выгоранию, т. е. окисленного, металла (рис. 77 и 78). Различные сорта пороха, давая различные по химическому составу продукты горения, оказывают, конечно, и неодинаковое коррозионное действие. В этом отношении нитроглицериновый порох является, повидимому, более сильно действующим, чем чистый пироксилиновый порох. По этому, еще не освещенному в литературе, вопросу — о влиянии газовой коррозии на сопротивление усталости при высоких температурах требуются дальнейшие исследования. Влияние же воды, а следовательно и электролитических процессов, при коррозии в условиях высокой температуры следует считать отпавшим.

Образованию трещин могут способствовать также местные загрязнения металла и наличие в нем включений (см. рис. 61 и 62). Однако трещины возникают и без участия включений и даже более того, в большинстве случаев они не связаны ни с порами металла, ни с местами залегания шлаковин.

Таким образом, образование сетки трещин зависит:

1) от температуры перегрева внутреннего слоя (поверхности канала) по отношению к средней температуре металла стенки ствола;

2) от величины предела текучести металла ствола при высоких температурах;

3) от коррозионного воздействия пороховых газов.

Коэфициент линейного (термического) расширения среднелегированных сталей мало отличается от к. л. р. обыкно-

Рис. 77. Сетка трещин в одном из орудийных стволов

Отложения меди чередуются с продуктами горения пороха. Шлиф поперечный

Ув. 100, ум. на $^3/_5$

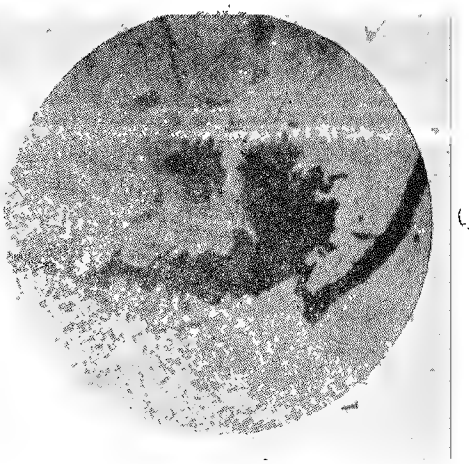


Рис. 78. Типичное явление выгорания металла

Трещина (справа) пересекает участок выгорания

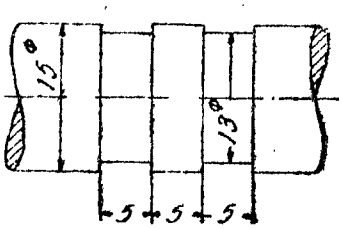
Ув. 100, ум. на $^3/_5$

венной углеродистой стали. Его величина изменяется, примерно, от $12 \cdot 10^{-6}$ при 20° до $16 \cdot 10^{-6}$ при 50°. В случае применения стали с очень малым к. л. р. будет иметь место лишь незначительная деформация, а следовательно и весьма малое напряжение металла при нагреве. Однако, не следует думать, что таким путем можно получить разрешение вопроса, так как высоколегированные стали, обладающие малым к. л. р. (например, сталь с 36% Ni), имеют плохую теплопроводность и низкий предел текучести при высоких температурах. Кроме того, с повышением температуры к. л. р. этих сталей значительно возрастает и приближается по величине к к. л. р. обыкновенной стали.

Вследствие чрезвычайно малой толщины „перегретого" поверхностного слоя, измеряемой десятыми долями миллиметра, трещины имеют незначительную глубину. Опасность разрыва ствола может возникнуть только в том случае, если произойдет остаточное расширение канала, вследствие повышения давления газов против нормального, и если при этом материал ствола будет обладать низкой ударной вязкостью (ср., например, пулеметный ствол, показанный на рис. 45; ствол получил раздутие вследствие смятия пули в канале, причем, в результате резкой концентрации напряжений, коррозионные трещины значительно углубились в стенку).

Особого рассмотрения требуют трещины во входящих углах нарезки. Эти трещины отличаются значительно большей глубиной, и их постепенное развитие приводит к выкалыванию полей (см. рис. 55, 64 и 65). В возникновении этих трещин известную роль играет также термический

эффект, но решающее значение в процессе их образования имеют переменные напряжения, вызываемые давлением ведущего пояска. При этом следует иметь в виду, что изгибающие напряжения в поле не достигают со стороны холостой грани столь значительных величин, чтобы в этом месте вызвать разрушение металла. Главной причиной образования трещин является эффект сдвига, обусловленного однако не собственно скалывающими напряжениями, а сопровождающими их наибольшими нормальными напряжениями. Последние действуют под углом ок. 45° к направлению главного скалывающего напряжения, а следовательно и к боковой поверхности ствола. Характер получающихся при этом линий разрушения (трещин) иллюстрируется вышеприведенными снимками на рис. 64 и 65.



Форма надреза	r мм	Число ударов до излома.
	0	12188
r=0,25мм	0.25	19130
r=1мм	1	26229
r=3мм	3	29584

Рис. 79. Испытание на ударную усталость углеродистой стали

Число ударов до излома возрастает с увеличением радиуса выкружки надреза

Рассмотренное действие ведущего пояска усугубляется влиянием тепловых напряжений, а также понижением предела текучести и сопротивления усталости вследствие высоких температур. Ввиду того, что прорыв газов, а в связи с этим и повышение температуры, наиболее сильно проявляется у холостой грани, то именно в этом месте происходит и наибольшее развитие процесса разрушения*. В отношении образующихся при этом трещин следует учитывать влияние надреза, каковым по существу является

* Это утверждение автора находится в противоречии с фактами. Наблюдения, относящиеся к большому числу изношенных орудийных стволов, позволяют считать установленным, что наибольшее разрушение металла как в виде образования наиболее глубоких трещин, так и в отношении поверхностного истирания, имеет место со стороны боевой грани. *(Прим. ред).*

стык грани поля с дном нареза. В случае отсутствия плавного перехода, в этом стыке сильно повышаются напряжения, и чрезвычайно усиливается опасность разрушения. Кроме приведенных выше результатов испытаний на усталость (рис. 75), очень показательными в этом отношении являются опыты по определению сопротивления ударной усталости образцов с надрезами, имеющими различные радиусы выкружки и изготовленными в виде нарезки (рис. 79). Полученные данные показывают, насколько значительно возрастает сопротивление (число ударов до излома) с увеличением радиуса выкружки.

Количественная оценка влияния надреза на предел усталости может быть сделана, например, на основании данных, приведенных на рис. 75, откуда видно, что снижение этого предела в случае полукруглого надреза составляет только от 10 до 15%, а при остром надрезе превосходит даже 50%. Поэтому весьма важное значение имеет принятие мер к устройству плавного перехода от поля к дну нареза.

Другим существенным обстоятельством, влияющим на получение выколов полей, является неполная досылка снаряда при заряжании, так как в этом случае при выстреле будет иметь место сильный удар снаряда в начало нарезной части канала.

4. Разрушение поверхности канала вследствие эрозии *

Как показывают результаты металлографического исследования, образование сетки трещин происходит при температурах, которые лежат ниже критической точки, т. е. 700°—800° (в зависимости от состава стали). В случае повышения температуры нагрева внутреннего слоя выше указанного предела, получает место новое явление. Сопротивление разрыву и предел текучести становятся минимальными, причем различные стали ведут себя в этом отношении, как видно из рис. 80, одинаково. Материал становится чрезвычайно пластичным, а прочность его значительно понижается. Столь высоко нагретый поверхностный слой канала до такой степени размягчается, что перестает оказывать достаточное сопротивление движущемуся газовому потоку и как бы

* В применении к износу стволов в русской литературе распространенными являются термины „разгар" и „выгорание". Эта терминология не может быть признана вполне удачной, т. к. не отвечает физико-химической сущности рассматриваемого явления, представляющего собою по существу именно горячую газовую эрозию. Принятый в немецкой литературе и применяемый автором термин „Ausschmelzung" относится к разрушению поверхности канала, вызванному этим явлением. Наиболее целесообразным представляется присвоить для определения данного явления термин „эрозия", как это имеет место во французской и английской литературе. *(Прим. ред.).*

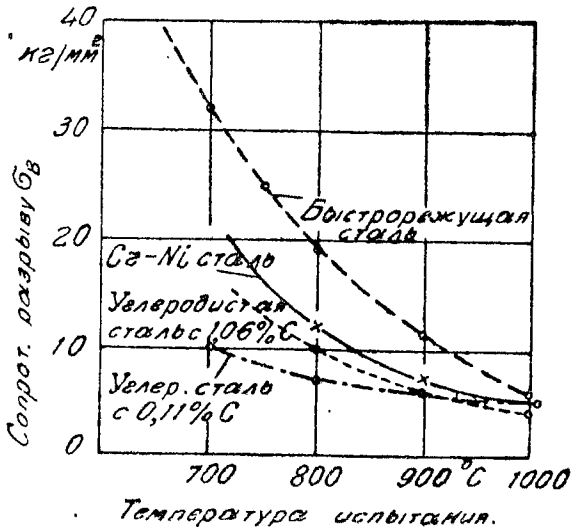


Рис. 80. Прочность различных сталей при температурах выше 700°

(По Гудремону и Эмке)

вымывается последним. Это явление можно уподобить действию вихреобразного течения воды на песчаное русло.

„Вымывания" металла вследствие эрозии происходят на тех участках канала, где имеет место наиболее сильное воздействие вихревых газовых струй, обладающих высокой температурой. Эти вымывания могут возникнуть в местах, на которых уже появились трещины, и которые, следовательно, подвергаются значительному нагреву, вследствие усиленного прорыва газовых струй. Но рассматриваемое явление не обязательно связано с трещинами. В крупнокалиберных стволах высокой мощности эрозия может происходить в результате прорыва газовых струй между ведущим пояском и стенкой канала, без предварительного образования сетки трещин (см. рис. 60).

Так как в местах, подвергшихся эрозии, поверхностная температура превышает критические точки стали, то она влечет за собою структурное изменение. Поэтому, в результате быстрого охлаждения после выстрела, происходит закалка поверхностного слоя на мартенсит, что в действительности и подтверждается металлографическим исследованием для хромоникелевой стали во всех случаях (см. рис. 67 и 68). Ввиду того, что углеродистая сталь требует для образования мартенсита значительно большей скорости охлаждения, чем хромоникелевая сталь, то условия охлаждения ствола не всегда оказываются достаточными в случае углеродистой стали для полного завершения мартенситного превращения во внутреннем слое. Поэтому при наличии явления эрозии в пулеметных стволах из обыкновенной углеродистой стали, содержащей нормально ок. 0,6% C, наблюдаются только местные мартенситные образования, а не сплошной мартенситный слой. В винтовочных стволах эрозия канала встречается лишь как редкое исключение.

В отношении образования и развития разрушений эрозионного характера (поскольку последние не обусловлены

предварительным образованием трещин), различные стали, применяемые в настоящее время для изготовления орудийных стволов, не показывают, при прочих равных условиях, сколько-нибудь существенной разницы. Несколько более высокая прочность хромоникелевых сталей при высоких температурах утрачивает свое значение, вследствие плохой теплопроводности этих сталей. Очень высоко легированные стали могут поддаваться даже более значительным эрозионным разрушениям, чем малолегированные или нелегированные стали, при воздействии газового потока одинаковой интенсивности.

5. Прорыв газов и порох

Температура пороховых газов зависит от химической природы пороха. Для винтовочного пироксилинового пороха указывается температура горения ок. 2500°, а для нитроглицеринового пороха, содержащего 48% нитроглицерина, ок. 3500° (Штеттбахер). Эта температура с понижением плотности заряжания, разумеется, понижается. Следовательно, газовый поток имеет наиболее высокую температуру в начале, а не в месте наибольшего давления газов. Затем эта температура значительно понижается, вследствие расширения газов и теплоотдачи стенкам ствола. Поэтому интенсивность образования трещин сильно уменьшается по направлению к дулу. Эрозионные разрушения канала в виде „вымывания" металла имеют место, как правило, только на начальном участке нарезной части. В дульной же части даже сильный прорыв газов к эрозионным разрушениям указанного типа не приводит.

В главном газовом потоке, движущем снаряд вперед, вихреобразные движения отсутствуют. Поэтому его теплообмен с поверхностью канала является очень ограниченным. Согласно расчетам Кранца[46], для винтовочного ствола ок. 33% тепловой энергии расходуется на движение пули, ок. 22% — на теплоотдачу стенкам ствола и ок. 44% — на энергию, остающуюся в газовом потоке (теплосодержание газов, вырывающихся из канала после вылета снаряда). Однако, несмотря на ограниченность теплообмена, в стволах высокой мощности количество тепла, поглощаемое стенками, оказывается достаточным, чтобы вызвать появление сетки трещин. Подтверждением этого положения служит тот факт, что в пороховой каморе на местах, не защищенных гильзой (в случае раздельного заряжания), образуется сетка трещин, правда, слабее выраженная, чем в начале

[46] *C. Cranz,* вышецитированный труд.

нарезной части. Остальная же поверхность каморы, защищенная гильзой, подвергается в момент выстрела значительно меньшему нагреву и остается неповрежденной трещинами.

Теплобмен, а следовательно и нагрев поверхности канала, значительно возрастает в случае образования газовых завихрений. Последние возникают во всех тех местах, где происходит резкое изменение направления или поперечного сечения газового потока. Поэтому, в зоне каморы, соответствующей срезу дульца гильзы, наблюдается, как правило, кольцеобразная сетка трещин (рис. 55), обязанная своим появлением вихревым движениям, вследствие местного сужения газового потока. Точно так же резкий переход от расширенной части каморы к собственно каналу ствола вызывает образование вихрей, сопровождаемое появлением сетки трещин, поскольку это место не защищено гильзой патрона[47]. Вопросу о форме переходного участка между каморой и нарезной частью канала должно уделяться особое внимание. В этом отношении следует учитывать результаты, достигнутые в области устройства сопел и лопаток паровых турбин, с целью избежания отрыва газового потока от стенок (так как это явление всегда служит причиной образования вихрей)[48].

Местные выкрашивания, шероховатости и образования ржавчины на поверхности канала могут также служить причиной возникновения вихрей и последующего усиленного образования трещин. Все эти дефекты следует удалять по мере возможности путем тщательной шлифовки.

Если образование сетки трещин уже произошло, то усилившаяся вследствие этого шероховатость канала приводит к повышению теплообмена, а следовательно и к ускорению процесса дальнейшего развития трещин.

Максимальное возрастание теплообмена происходит при прорыве газовых струй между ведущим пояском и стенками ствола. В этом случае имеет место наиболее выраженное вихревое движение газов, которое приводит к полному или, по меньшей мере, к почти полному теплообмену.

Причиной прорыва газовых струй служит всегда плохая обтюрация. В этом отношении особенно неблагоприятные условия имеют место в части канала, отвечающей положению ведущего пояска снаряда при заряжании. В этой части и наблюдается наибольший износ канала как в форме обра-

---

[47] Если подобные вихри возникают еще в патронной гильзе, в случае наличия в ней резкого сужения в передней части, то нагрев стенок ствола в этом месте будет незначительным, но зато металл гильзы будет испытывать значительные напряжения.

[48] О форме сопел и лопаток паровых турбин см. *A. Stodola,* Dampf- und Gasturbinen. Springer: Berlin 1924.

зования трещин, так и в виде эрозионных разрушений. Поэтому чрезвычайно важное значение имеет плотная досылка снаряда при заряжании, для обеспечения возможно лучшей обтюрации. Хорошая досылка снаряда имеет также существенное влияние на усилия, развивающиеся в полях нарезки. Это влияние особенно сильно сказывается при применении снарядов большого веса. Заряжание унитарным патроном в обоих отношениях уступает раздельному заряжанию, обеспечивающему возможность плотной досылки снаряда. Начало нарезной части находится в неблагоприятных условиях, кроме того, еще по той причине, что время действия прорывающихся газовых струй, вследствие малой скорости снаряда в начале движения, является относительно большим.

Но если даже врезание полей в ведущий поясок и произошло, — все-таки полную обтюрацию нельзя считать достигнутой. Во время процесса врезания, совершающегося в начале движения снаряда, давление газов относительно мало. Затем, по мере перемещения снаряда, оно значительно возрастает. Вследствие этого происходит упругое расширение ствола и, следовательно, образуется зазор между стенками ствола и ведущим пояском. В случае крупных калибров это расширение достигает величины, подлежащей учету. Так, для ствола калибра d *мм*, с толщиной стенки в один калибр, при давлении газов p *кг/см*^{2} расширение канала

$$\Delta = 0{,}795\ dp\ 10^{-6}\ мм,$$

что для $d = 356$ *мм* и $p = 2500$ *кг/см*^{2} дает $\Delta = 0{,}7$ *мм*. Правда, в сечении ствола, отвечающем положению ведущего пояска, действительное расширение будет несколько меньше, вследствие влияния передней части ствола, еще не получившей деформации. Однако значение вопроса об упругой деформации ствола не следует недооценивать и при конструировании ведущего пояска необходимо соответствующим образом учитывать.

В ведущих поясках обычного устройства это требование в расчет не принимается. При проектировании все внимание устремляется на обеспечение наилучших условий ведения снаряда, а не на достижение полноты обтюрации, несмотря на всю важность этого фактора. Эта сторона дела нуждается в улучшении.

Известно, что крупнокалиберные стволы большой мощности значительно больше страдают от износа, в частности от эрозии, чем стволы меньших калибров. Причина этого заключается прежде всего в трудностях получения хорошей обтюрации, возрастающих с увеличением калибра.

Упругое расширение канала при постоянном давлении почти пропорционально калибру. В таком же отношении возрастает глубина нарезов и влияние прочих факторов,— так что можно принять, что ширина сечения зазора увеличивается пропорционально калибру. Следовательно и количество тепла, приходящегося на единицу поверхности канала, будет возрастать, примерно, в том же отношении.

Далее, если учесть, что длительность воздействия вихревого газового потока на элемент поверхности канала также примерно пропорциональна калибру (при равенстве скорости движения снаряда и при сохранении подобия ведущего пояска), то и в этом отношении влияние рассматриваемого теплового эффекта будет сказываться более неблагоприятно для орудий крупного калибра.

Из предыдущего следует, что с увеличением калибра интенсивность износа должна повышаться сильнее, чем величина калибра в первой степени. Автор считает, что при сохранении прочих равных условий износ возрастает примерно пропорционально $d^{\frac{3}{2}}$. Чем больше калибр и чем выше мощность орудия, тем меньше будет живучесть и тем большее, следовательно, значение прибретает вопрос о безупречности конструкции ведущего пояска в отношении обтюрации.

При наличии пояска обыкновенного устройства, зазор между пояском и стенками ствола в крупнокалиберных орудиях большой мощности может получить столь значительную величину, что, при каждом выстреле, в начале нарезов с поверхности канала будет оплавляться и выноситься газовой струей слой толщиной в несколько сотых миллиметра.

Значительный по величине зазор,— а следовательно и возникновение процесса эрозии,— может образоваться, как результат предшествующего истирания и выкрашивания поверхности канала. Поэтому и в тех стволах, в которых началом износа является образование рассмотренных выше трещин теплового происхождения, в результате последующего истирания и выкрашивания поверхности канала (вследствие механического действия газового потока и трения ведущего пояска) постепенно создаются также условия, приводящие к эрозии. Наглядное представление о получившихся таким путем эрозионных разрушениях канала дает рис. 59. С появлением разрушений этого вида износ ствола значительно ускоряется.

Это обстоятельство схематически представлено на диаграммах рис. 81—83, показывающих связь между числом выстрелов, сделанных из ствола, и его боеспособностью в смысле сохранения действительности огня.

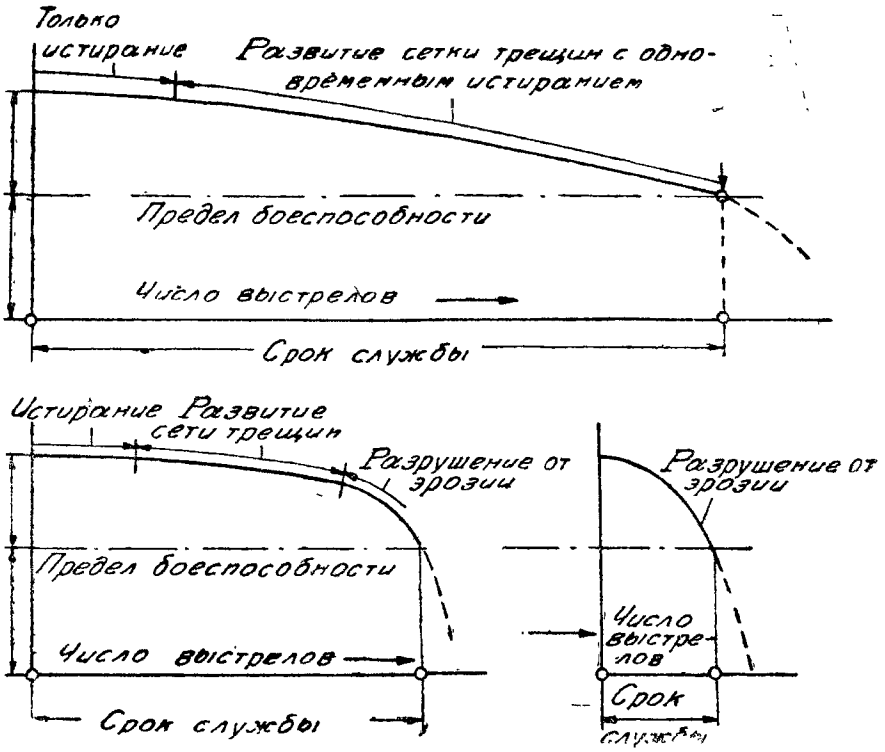


Рис. 81—83. Падение боеспособности ствола с увеличением числа выстрелов

Рис. 81 относится к стволам малой и средней мощности
Рис. 82 относится к стволам большой мощности
Рис. 83 относится к стволам максимальной мощности

Если износ сводится к образованию трещин и механическому истиранию, то боеспособность ствола понижается относительно медленно, как это видно из схемы рис. 81, относящейся к орудиям малой и средней мощности. Но, как только, вследствие выкрашиваний металла и других причин, получают место разрушения канала эрозионного характера, — происходит быстрое падение боеспособности, как это иллюстрируется схемой рис. 82, относящейся к стволам большой мощности.

В стволах наиболее крупных калибров, обладающих максимальной мощностью, разрушение канала в форме образования трещин сводится к минимуму или даже совершенно отсутствует (см. рис. 83). При этом наклон кривой, стремящейся к пересечению линии предела боеспособности, будет тем круче, чем выше мощность и чем больше калибр ствола. Живучесть последнего будет на много меньше, чем в случаях, показанных на рис. 81 и 82. Возрастание других неблагоприятных влияний (уменьшение теплоотвода, ухудшение обтюрации и т. д.) будет действовать в том же направлении.

6. Значение теплопроводности

Температура внутреннего, поверхностного слоя ствола, а следовательно образование трещин и эрозионные разрушения, находятся в зависимости от теплопроводности стали и от условий охлаждения ствола во время пауз между выстрелами. Теплопроводность определяется химическим составом стали, который в то же время имеет решающее значение для величин предела текучести и предела усталости. Принимается, что в границах теплопроводности, свойственной легированным конструкционным сталям, полезное влияние в отношении повышения предела текучести с одновременным сохранением высокой способности к упрочнению, оказывает прибавление никеля, при дополнительном введении в сталь еще хрома, вольфрама, молибдена или ванадия и при надлежащем улучшении. При этом считается, что образование трещин и износ задерживаются в большей мере, чем повышается концентрация тепла во внутреннем слое, вследствие уменьшения теплопроводности стали. Этим объясняется значительно большая живучесть стволов полевой пушки, изготовленных из стали с высоким содержанием никеля ($5 — 7\%$) и содержащей кроме того от 1 до 2% вольфрама или хрома, чем стволов того же образца, изготовленных из менее легированной хромоникелевой стали. Следовательно, применение легированных сталей, обладающих повышенными значениями предела текучести и предела усталости при высоких температурах, представляет несомненные преимущества. Однако надо иметь в виду, что повышение предела текучести должно достигаться за счет легирования стали и надлежащей термической обработки (улучшения). От повышения же предела текучести путем чисто холодной обработки ожидать полезного эффекта в отношении живучести не приходится.

К конструкции ствола предъявляется требование уменьшения до возможного минимума концентрации тепла во внутреннем слое стенки. Поэтому следует предусматривать возможно совершенный отвод тепла от внутренней поверхности к наружной. Все поверхности раздела между отдельными слоями ствола должны быть обработаны таким образом, чтобы мог иметь место беспрепятственный отвод тепла.

С этой точки зрения, наличие окислов на поверхностях, подготовленных к скреплению, следует рассматривать, как вредное явление. Окраска ствола может также оказать вредное влияние в том случае, если она способствует сосредоточению тепла в стенке. Но зато воронение повышает теплоотдачу в окружающую воздушную среду.

К особенно вредным последствиям приводит не вполне плотное прилегание друг к другу отдельных слоев ствола.

В силу этого автор считает, что проволочное скрепление, способствующее сосредоточению тепла во внутреннем слое ствола, является менее благоприятным в отношении живучести, чем скрепление цилиндрами, так как, в последнем случае, в большей степени обеспечивается плотное прилегание тщательно обработанных поверхностей скрепляемых и скрепляющих слоев.

Действительно, из опубликованных в разных журналах сведений следует, что стволы, скрепленные проволокой, всегда заметно уступают в отношении живучести стволам германской или французской артиллерии, скрепленным цилиндрами. Так, например, в „Mitteilungen aus dem Gebiete des Seewesens“ за 1913 г. приводятся следующие данные:

по 30,5-*см* калибру

Стволы, скрепленные цилиндрами:	Живучесть
30,5-*см* германская пушка *L*/50	220 выстр.
30,5-*см* французская пушка	200 „
Стволы, скрепленные проволокой:	
30,5-*см* японская пушка *L*/50	80 „
30,5-*см* итальянская пушка L/46	80 „

по 34,3 и 35,6-*см* калибру

Ствол, скрепленный цилиндрами	
35,6-*см* американская пушка	150 „
Ствол, скрепленный проволокой	
34,3-*см* английская пушка	60 „

В случае применения свободного ляйнера, вставляемого в оболочку с зазором, выбираемым только при достижении давлением газов известной величины, наличие воздушной прослойки может оказать неблагоприятное влияние на теплообмен и теплопроводность. В какой мере окажется сниженной вследствие этого живучесть свободного ляйнера должны показать соответствующие испытания.

7. Износ и нарезка

При применении медных ведущих поясков истирание орудийного металла является весьма незначительным до тех пор, пока не образовалась сетка трещин и канал сохра-

няет гладкую поверхность. По этой причине износ полей в дульной части наблюдается всегда лишь в слабой степени.

Совершенно иначе ведут себя железные пояски. В силу оснований, изложенных при рассмотрении пульных оболочек (см. стр. 118), износ канала в этом случае чрезвычайно возрастает. Результатом применения железных поясков является разъедание (Anfressen) и сильное истирание поверхности канала. Особенное развитие получают эти явления в случае нагонки железных поясков на снаряды с сильной нагартовкой железа. Но даже при особых способах нагонки железных поясков, позволяющих посредством конструктивных мероприятий избежать большого наклепа, все-таки указанные явления остаются в силе. При этом необходимо иметь в виду, что степень наклепа железных поясков вследствие деформации при врезании полей будет значительно большей, чем для медных поясков.

Железные ведущие пояски даже из мягкого электролитического железа должны быть отвергнуты, хотя они в новых стволах и обеспечивают безупречное ведение снаряда, а также хорошую действительность огня. Дело в том, что они настолько значительно уменьшают живучесть, что получающаяся экономия в меди будет перекрыта большим расходом стволов вследствие выхода из строя. Возможность устранения этого недостатка посредством плакировки железных поясков медью или томпаком с экономической точки зрения представляется сомнительной. При плакировке толщина слоя наложенного металла должна быть настолько велика, чтобы при врезании полей, а также при истирании пояска во время дальнейшего перемещения в канале, основная масса металла пояска была не затронута. Автор считает, что в настоящее время медь является самым лучшим материалом для ведущих поясков.

Если в начале нарезной части уже образовалась сетка трещин, то, даже в случае применения медных ведущих поясков, наступает ускорение износа полей вследствие происходящего при этом усиления теплового воздействия газового потока на поверхность канала. Истирание медных поясков при этом, разумеется, значительно возрастает.

Признаком указанного повышения износа является скругление ребер и сглаживание полей в начале нарезки, как это можно видеть, например, из рис. 54. Сглаживание полей, в свою очередь, приводит к ослаблению сцепления пояска с нарезкой, провороту последнего и к столь сильному истиранию его выступов, что условия правильного ведения снаряда не могут быть восстановлены даже в дульной части канала, сохранившей нарезы в исправном состоянии.

В связи с этим необходимо остановиться на рассмотрении вопроса о конструкции нарезки. Крутизна нарезов у

дула определяется требованием сообщения снаряду надлежащей устойчивости на полете. Это требование может быть осуществлено либо посредством нарезки постоянной крутизны, либо посредством прогрессивной нарезки. В первом случае давление на боевую грань будет пропорционально давлению пороховых газов на дно снаряда; в случае же нарезки прогрессивной крутизны, величина максимального давления на боевую грань может быть уменьшена. Но это

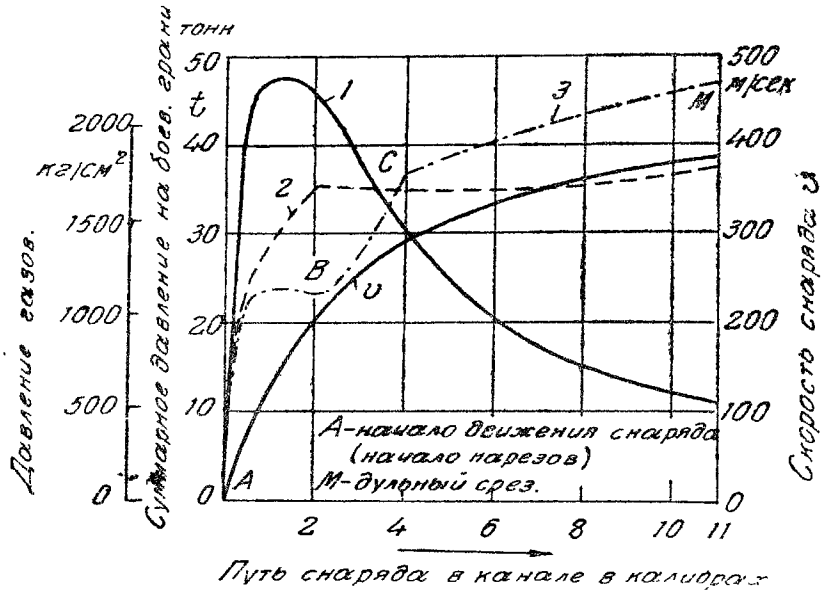


Рис. 84. Кривые давления на боевые грани для 20-*см* мортиры (вес снаряда 104 *кг*, начальная скорость 390 *м/сек*

Кривая 1. Давление на боевые грани при нарезке постоянной крутизны с углом наклона 7°10′. В соответствующем масштабе эта же кривая изображает кривую давления газов на дно снаряда

Кривая 2. Давление на боевые грани для обычной прогрессивной нарезки с углом наклона, постепенно возрастающим от 3°36′ до 7°10′

Кривая 3. Давление на боевые грани для предлагаемой прогрессивной нарезки: от *A* до *B* угол наклона постоянный и равный 3°36′, от *B* до *M* он постепенно возрастает до 7°10′

преимущество не следует переоценивать. При обычной прогрессивной нарезке можно, как это показывает рис. 84 для 20-*см* мортиры, давление на боевую грань на начальном участке движения снаряда понизить, примерно, на 25%. Но это снижение покупается ценой возрастания рассматриваемого давления в дульной части ствола, причем на протяжении канала от места наибольшего давления газов до дульного среза оно остается почти постоянным. Поэтому для ствола, находящегося в хорошем состоянии, суммарная потеря энергии при прогрессивной нарезке будет

больше. Это находится в соответствии с опытами Нобля, который для нитроглицеринового пороха (кордита) установил потерю энергии 1,4% при нарезке постоянной крутизны и 2,3%—при прогрессивной нарезке (для черного пороха разница была еще больше). Но, с другой стороны, следует иметь в виду, что в изношенном стволе как раз начальный участок нарезки является наиболее шероховатым и, следовательно, обусловливает усиленное истирание и значительное ухудшение условий ведения снаряда. Исходя из этого, представляется желательным в известной стадии износа ствола уменьшение давления на боевую грань в начале движения снаряда, т. е. применение нарезки прогрессивной крутизны. Автор, обращавший внимание на это обстоятельство еще в 1917 г., в данном отношении присоединяется к мнению Юстрова[49].

Однако автор не считает целесообразной применяемую до настоящего времени обычную конструкцию прогрессивной нарезки, при которой возрастание угла наклона (крутизны) нарезки начинается от самого начала нарезов. При такой конструкции отрицательные стороны прогрессивной нарезки, среди которых преобладающее значение имеет уширение выемок (отпечатков полей) на ведущем пояске и связанное с этим ухудшение обтюрации и условий ведения снаряда, особенно проявляют себя именно на наиболее угрожаемом участке канала, т. е. от начала нарезов до места наибольшего давления газов. Поэтому автор рекомендует такое устройство прогрессивной нарезки, при котором начальная крутизна нарезки на этом участке канала остается постоянной и, только начиная с места наибольшего давления газов, нарезка получает переменную крутизну, рассчитанную таким образом, чтобы обеспечить конечный угол наклона нарезов у дульного среза. Расчет предлагаемой нарезки должен предусмотреть, кроме того, отсутствие скачкообразного повышения давления на боевую грань в месте перехода постоянной крутизны нарезки в переменную[50]. Эта конструкция повлечет за собой некоторое повы-

---

[49] *Justrow.* Heerestechn. Bd. I (1923), S. 2.

[50] Если уравнение развернутой кривой нареза дано в виде $y = f(x)$, где x путь снаряда в *см*, то угол наклона нареза α_x (т. е. угол между касательной к кривой и осью канала) получится из выражения $\operatorname{tg} \alpha_x = dy/dx$.

Обозначив через R (*кг*) величину суммарного усилия, действующего между выступами пояска и боевыми гранями полей (по нормали к винтовой нарезки), а через n — число нарезов, будем иметь, что величина усилия, приложенного к боевой грани каждого поля, составляет $\frac{R}{n}$.

Выражение для R имеет следующий вид:

$$R = 4\frac{J}{D^2}\frac{1}{\cos\alpha_x - \mu\sin\alpha_x}\left(\operatorname{tg}\alpha_x\frac{p_\lambda q}{m(1+\xi)} + v_x^2\frac{d\operatorname{tg}\alpha_x}{dx}\right),$$

шение давления на боевую грань в дульной части канала по сравнению с прогрессивной нарезкой обычного типа. Но зато она дает улучшение обтюрации и уменьшение давления на боевые грани полей на наиболее ответственном участке нарезной части канала. И хотя при дальнейшем перемещении снаряда будет происходить постепенное истирание ведущих граней выступов пояска вследствие увеличения крутизны нарезки, — как это всегда имеет место при нарезке прогрессивной крутизны, — и давление на боевые грани полей будет значительно возрастать, тем не менее влияние этих отрицательных моментов будет менее вредным, так как на протяжении канала от места наибольшего давления газов до дульного среза происходит быстрое падение давления и понижение температуры газового потока и, в связи с этим, сильное уменьшение интенсивности износа. Кривая 3 на рис. 84 показывает весьма значительное понижение давления на боевые грани на ответственном участке пути снаряда при исполнении нарезки по предложению автора.

где D — калибр (*см*), J — момент инерции снаряда по отношению к его продольной оси (*кг·см·сек*^{2}), m — масса снаряда (*кг·сек*^{2}/*см*), p_x — давление газов (*кг/см*^{2}), q — площадь поперечного сечения (*см*^{2}), на которую действует давление газов, т. е. $q = 1{,}03\frac{\pi D^2}{4}$, где коэфициент 1,03 введен для учета нарезов, v_x — скорость движения снаряда (*см/сек*) на пути x, μ — коэфициент трения между пояском и полями нарезки, ξ — коэфициент, учитывающий потерю энергии газов в стволе вследствие влияния нарезов, ускорения заряда и т. д., принимаемый в среднем ок. 0,11. Двучлен $\cos\alpha_x - \mu\sin\alpha_x$ весьма близок к 1 и, в среднем, при $\mu = 0{,}2$, может быть принят ок. 0,97.

Тогда выражение для R упрощается:

$$R = 4{,}12\frac{J}{m}\left(0{,}73p_x\operatorname{tg}\alpha_x + v_x^2\frac{m}{D^2}\frac{d\operatorname{tg}\alpha_x}{dx}\right).$$

Если J неизвестно, то для обычных снарядов можно приближенно принять $\frac{J}{m} = \frac{D^2}{8}$ до $\frac{D^2}{7}$.

Кривые давления R, приведенные на рис. 84, рассчитаны согласно последнего выражения. Если кривая 3 на начальном участке, от A до B, отвечает постоянной крутизне, а затем крутизна становится переменной, то для того, чтобы избежать скачкообразного изменения, сочленение кривых постоянной и переменной крутизны посредством касательной является недостаточным. Следует обратить внимание на то, чтобы вторая производная d^2y/dx^2 также изменялась плавно. Соответственно этому и должна быть подобрана кривая нарезки, причем является целесообразным, чтобы она давала возможно меньший подъем давления R в дульной части. Для примера, показанного на рис. 84, кривая нарезки от A до B имеет прямолинейный участок ($\alpha = 3°36'$). От B до M угол наклона возрастает с 3°36′ до 7°10′ таким образом, что часть кривой нарезки от C до M является кривой второго порядка, а промежуточный участок между B и C представляет собою кривую третьего порядка.

Однако, применение нарезки предлагаемой конструкции можно считать целесообразным только в том случае, если ведущий поясок не должен иметь слишком большой ширины. Отрицательное влияние уширения отпечатков полей на пояске вследствие возрастания крутизны нарезки особенно сильно сказывается в случае устройства двух ведущих поясков, и тем в большей степени, чем больше расстояние между поясками.

Истирание медных поясков служит причиной известного явления омеднения канала. При этом оторвавшиеся частицы меди увлекаются горячим газовым потоком и разбрызгиваются по впереди расположенной поверхности канала и снаряда подобно тому, как это имеет место при шоопировании. Медь проникает в самые незначительные углубления, в том числе и в трещины (как это показано, например, на рис. 63 и 77) и поэтому чрезвычайно плотно пристает к поверхности канала. Известный способ удаления омеднения посредством специальных стрельб с оловянными пластинками* дает хороший результат, так как при этом образуется медно-оловянный сплав, который при высоком содержании олова отличается низкой температурой плавления и хрупкостью и поэтому уносится при выстреле вместе со снарядом из канала ствола.

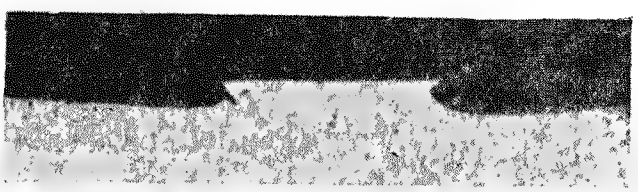


Рис. 85. Сплющивание полей

Хорошее, достаточно протяженное по длине и плотное прилегание пояска к элементам нарезки имеет большое значение не только с точки зрения обтюрации, но в целях избежания колебания снаряда в канале. Последнее же явление может привести к сплющиванию полей (рис. 85) и — что особенно важно — к понижению меткости.

Г. Заключение

В изношенных стволах огнестрельного оружия наблюдаются три вида разрушения: истирание (механический износ), образование сетки трещин, приводящее часто к выкрашиваниям, и разрушение, вследствие эрозии. Эти явления в большинстве случаев совпадают во времени и взаимно влияют друг на друга.

---

* Припаевыемыми к дну снаряда или вкладываемыми в пороховой заряд. (*Прим. ред.*).

В стволах стрелкового оружия преобладающим является процесс чисто механического износа, причем развитию этого процесса способствует образование легкой сетки трещин. Разрушения эрозионного характера являются редким исключением. Причиной возникновения и развития износа этих стволов служит процесс трения, находящийся в свою очередь в зависимости от ряда факторов, из которых решающее значение имеет температура. Ускорение темпа стрельбы, применение пороха, обладающего большим теплосодержанием, и недостаточное охлаждение ствола способствуют ускорению его износа. Наряду с этим оказывают влияние конструкция пули, материал пульной оболочки и ствола, а также устройство нарезки.

В случае орудийных стволов главной причиной износа является образование сетки трещин, приводящее к местным выкрашиваниям и выколам полей, а затем к эрозионным разрушениям. В стволах высокой мощности последние образуются также непосредственно. К этому присоединяется процесс механического истирания, ускоряющего общий износ канала. Износ орудийных стволов обусловливается в первую очередь термическим воздействием, которое является неизбежным следствием высокой температуры пороховых газов. Поэтому для повышения живучести стволов приходится стремиться к возможному уменьшению вредного влияния указанного воздействия, т. е. должны быть приняты все меры к уменьшению теплообмена между газами и стенками ствола и к понижению вредного влияния температурного градиента.

Вихревой газовый поток сильно повышает теплообмен и в то же время оказывает неблагоприятное механическое воздействие. Поэтому в первую очередь следует принимать меры в отношении хорошей обтюрации ведущего пояска. Конструкция последнего в этом отношении является обычно не безупречной. По той же причине, а также в целях избежания возникновения динамических напряжений в начале нарезки, вследствие удара снаряда, необходимо обеспечение хорошей досылки последнего при заряжании, — что имеет особенно важное значение в случае тяжелых снарядов крупного калибра. В отношении устройства пороховой каморы следует избегать резкого перехода к нарезной части канала, так как местное сужение сечения в конусе врезания служит причиной отставания газового потока от стенки и образования завихрений. Всякого рода повреждения на поверхности канала должны своевременно обнаруживаться и заглаживаться.

Наиболее подходящим материалом для ведущих поясков является медь. Железо, даже в наиболее мягком состоянии, должно быть отвергнуто, так как оно приводит к сильному

износу. В отношении профиля нарезки следует иметь в виду необходимость устройства хороших закруглений при переходах от полей к нарезам.

С точки зрения сохранения канала ствола, пироксилиновый порох имеет значительное преимущество перед нитроглицериновым. Если последний и приходится применять вследствие других высоких качеств (более высокая мощность, применение различных зарядов и т. д.), то при этом следует придерживаться относительно небольшого содержания нитроглицерина, по возможности не превосходящего 25%. Это условие является особенно важным в отношении стволов высокой мощности и обладающих большой плотностью заряжания. Вопрос о коррозионном действии пороховых газов, образующихся при сгорании различных порохов, пока еще не вполне выяснен.

Большое значение имеет хороший отвод тепла, как во время самой стрельбы, так и во время пауз между отдельными сериями выстрелов. Поэтому следует избегать наличия большого числа поверхностей раздела в конструкции ствола, как это имеет место при проволочном скреплении. Должны быть приняты меры к возможно лучшей теплоотдаче наружной поверхности ствола.

Материал для изготовления стволов должен обладать большим сопротивлением усталости при высоких температурах и большим сопротивлением истиранию, — также в условиях работы при высоких температурах. В отношении сопротивления усталости сказанное относится в особенности к предельным напряжениям цикла при числе циклов ниже 100000. Как сопротивление усталости в указанном смысле, так и сопротивление истиранию находятся в зависимости от способности материала к упрочнению. Поэтому стволь ному материалу посредством целесообразного легирования и операций нормального улучшения (для получения сорбитной структуры) должны быть приданы высокие свойства прочности, при сохранении хорошей вязкости. Одностороннее повышение предела текучести путем только холодной обработки является недостаточным. Специальная сталь со структурой аустенита может дать благоприятный результат, но только при наличии достаточно высокого предела текучести.

Изложенные требования имеют особенно важное значение в отношении механических свойств материала, служащего для изготовления внутренней трубы ствола. Таким образом соответствие этого материала своему назначению не ограничивается только одним требованием определенной величины предела текучести, необходимой для обеспечения требуемого предела упругого сопротивления ствола.

В связи со значительным возрастанием мощности современных орудий, сопровождающимся понижением их живу-

чести, перед конструктором в настоящее время стоит весьма важный вопрос о быстром восстановлении изношенных стволов посредством легко сменяемых внутренних труб*. Применение последних является пока наиболее успешным способом борьбы с уменьшением живучести орудий, вследствие повышения их мощности и калибра.

Легко сменяемые трубы имеют относительно тонкие стенки и требуют применения высококачественной стали. Следует ли изготовлять внутреннюю трубу из дешевого материала и иметь при этом пониженную живучесть, или же применять для этой цели высококачественный, но зато дорогой материал, обеспечивающий и больший срок службы трубы, — является вопросом экономического порядка.

---

* Под легко сменяемыми трубами следует разуметь, согласно принятой у нас терминологии, свободные ляйнеры и свободные трубы. (*Прим. редак.*).

V. МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТВОЛОВ И ЕГО ОТНОШЕНИЕ К ДЕЙСТВИЮ НЕНОРМАЛЬНО ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ

А. Общие соображения

Основные положения в отношении выбора материала, вытекающие из рассмотрения процессов, связанных с износом стволов, нуждаются еще в дополнении их требованиями, предусматривающими поведение материала в случаях непредвиденного повышения давления газов. Такие случаи могут иметь место в результате употребления порохового заряда ненормально большого веса, заклинения снаряда в канале и т. п. Сюда же следует отнести также преждевременные разрывы снарядов в канале, имеющие характер детонации. Во всех этих случаях в стенке ствола возникают напряжения, значительно превосходящие упругие свойства материала и вызывающие сильную пластическую деформацию. Эти напряжения достигают особенно высоких значений в случае детонирующего разрыва снаряда и зависят от величины разрывного заряда. Вследствие получающегося при этом раздутия, ствол выбывает из строя. Возможность же разрыва ствола, в целях безопасности орудийного расчета и сохранения от разрушения всей системы, должна быть полностью устранена. В отношении непредвиденного повышения давления газов последнее условие может быть обеспечено путем применения достаточно вязкого материала. Что же касается гарантии от разрушения ствола при разрыве снаряда в канале, то она может быть обеспечена только при употреблении малых разрывных зарядов (для полевых пушек от 0,15 до 0,20 *кг*) и применении ствольного материала очень высокого качества (например, улучшенной хромоникелевой стали). Если же снаряды снаряжены разрывными зарядами значительного веса, то приходится удовлетворяться такой вязкостью материала, которая, не будучи в состоянии совершенно воспрепятствовать разрыву ствола, обеспечивала бы по крайней мере от получения большого числа мелких осколков.

Таким образом, к требованию высоких характеристик прочности (σ_S и σ_B), вытекающему из величин рабочих напряжений в стенке ствола, присоединяется еще требование высокой вязкости материала в условиях пластической деформации, вызванной действием значительных напряжений динамического характера.

В целях выработки условий для выбора материала, прежде всего необходимо рассмотреть вопрос о влиянии этой пластической деформации, т. е. о раздутии ствола.

Б. Деформирование ствола вследствие повышенного давления газов

Из предыдущего известно, что только в результате действия очень высокого давления газов, значительно превосходящего расчетный предел упругого сопротивления ствола (т. е. величину, учитывающую и запас прочности), происходит остаточное расширение канала, составляющее всего лишь 0,4% калибра (стр. 41). Отсюда следует, что даже очень значительное повышение давления газов во время стрельбы не сообщает горению пороха характера детонации и может привести лишь к относительно умеренной пластической деформации ствола. Эта деформация далеко не достигает той величины удлинения при разрыве, которая обычно предписывается техническими условиями (не менее 12—16% для поперечных образцов)[51], если даже допустить, что способность материала к формоизменению была бы полностью использована и при динамических напряжениях, развивающихся при выстреле. Это положение сохраняет свою силу также и при разрыве снарядов, имеющих малый разрывной заряд. Разрыв же снарядов, снаряженных большим разрывным зарядом, приводит к столь значительному расширению ствола, что происходит его разрушение при любом качестве материала.

Громадная скорость формоизменения при взрыве или детонации, даже в случае очень вязкого материала, не допускает возможности получения столь значительной деформации материала до наступления разрушения, которая может иметь место при действии статического усилия. В особенно сильной степени это замечание относится к случаю детонации. Однако, как показывают результаты специальных взрывных опытов * с особо вязкой, улучшенной хромоникелевой сталью, возможность получения при вы-

[51] Французские технические условия, например, для орудий морской артиллерии требуют удлинение не менее 12% (по Жакобу). В других технических условиях указываются и более высокие значения.

* См. ниже „взрывную пробу" цилиндров. [*Прим. ред.*].

Рис. 86. Вид излома ствола, разорвавшегося при выстреле

стреле значительной пластической деформации без разрыва нельзя считать исключенной. Каждый материал, в зависимости от его природы и состояния, имеет свой предел способности к деформации. Однако, бывают случаи образования трещин или даже полного разрушения ствола и при очень малой пластической деформации его. Подобные несчастные случаи приводят к тяжелым последствиям. Ближайшему рассмотрению причин этих случаев и посвящено последующее изложение.

1. Хрупкий излом

Под хрупким изломом (или разрывом) разумеется такой род разрушения материала, при котором свойство вязкости остается неиспользованным. Примером такого разрушения может служить показанный на рис. 86 вид излома ствола, разорвавшегося в военное время.

В зависимости от свойств материала, разрушение ствола может иметь характер либо хрупкого излома, либо вязкого разрыва, происходящего только после значительной пластической деформации. Весьма показательными в отношении различия между этими видами разрушения являются результаты взрывной пробы внутренних труб стволов, показанные на рис. 111—114. Таким образом, решающее значение в отношении характера деформирования ствола при повышенном давлении или детонации имеет большая или меньшая склонность материала к образованию хрупкого излома, которая и ограничивает степень пластической деформации в условиях очень быстрого развития давления.

Материал может быть хрупким во всей массе ствола, но для получения преждевременного разрыва достаточно уже наличие отдельных местных объемов, обладающих свойством хрупкости. Степень склонности материала к образованию хрупкого излома определяется химическим составом, а в особенности структурным состоянием, которое в свою очередь находится в зависимости от условий изготовления и термической обработки. Металлургические дефекты во всех сортах стали могут весьма значительно увеличить опасность получения хрупкого излома вообще, а в условиях анормального действия выстрела в особенности. Эта опасность

для всех материалов может быть вызвана также действием надрезов, влияние которых сказывается тем больше, чем меньше ударная вязкость материала.

2. Конструктивные мероприятия

С конструктивной точки зрения следует избегать, следовательно, резких изменений сечения, местных скоплений массы, а также наличия пик и напряжений [52]. Эти обстоятельства необходимо учитывать в отношении устройства затворной части ствола и самого тела затвора. Наличие выемок металла, пазов и т. п., имеющих резкие очертания, обусловливает, вследствие образования местных пик напряжений, опасность разрушения изделия, которая становится тем большей, чем более значительна деформация, происходящая в этих местах в результате повышения давления газов. Нарезка затворного гнезда в кожухе или внутренней трубе ствола нередко служит причиной разрыва последнего, — в особенности, в случае недостаточно вязкого материала. Применяемое в английской и французской артиллерии устройство, заключающееся в том, что подвергающаяся значительным усилиям нарезка для затвора помещается не в кожухе, а в особом кольце, ввинчиваемом с натяжением в кожух, уменьшает опасность разрыва, так как этому относительно небольшому и тонкостенному кольцу может быть сообщена повышенная вязкость за счет хорошей проковки и термической обработки. В теле затвора, всегда имеющем внутренние полости для помещения стреляющего и движущего механизмов, не может быть полностью устранено влияние надрезов, какая бы выгодная форма этим полостям ни придавалась. Поэтому материалом для изготовления затвора всегда должна служить хорошо термически обработанная сталь, обладающая высокой ударной вязкостью. Требование устранения резких переходов в сечении и скачков напряжений следует иметь в виду и при конструктивном оформлении скрепленных стволов, устраивая плавные переходы по наружной поверхности в местах окончания наружных слоев и постепенно уменьшая величины натяжений.

3. Испытания на хрупкий разрыв образцов с надрезом

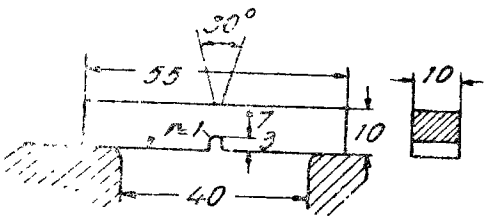
Для всех сортов стали возможность получения хрупкого излома возрастает с увеличением скорости деформирования, с затруднением деформации в поперечном сечении и с по-

---

[52] См. *A. Thum* u. *W. Buchmann.* Dauerfestigkeit und Konstruktion. — VDI — Verlag. Berlin 1932; *E. Lehr.* Spannungsverteilung in Konstruktionselementen. VDI — Verlag. Berlin 1934.

нижением температуры. При деформировании ствола, в особенности в случае детонации, имеет место очень большая скорость деформации. В известной степени имеется также затруднение свободной деформации в поперечном сечении. Влияние низких температур может сказаться при стрельбе во время зимних холодов.

Разные сорта стали обладают неодинаковой чувствительностью в отношении возможности получения хрупкого излома. Так как получаемые в результате обычного испытания на разрыв величины удлинения и поперечного суже-



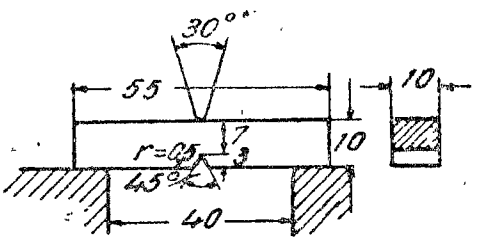


Рис. 87 и 88. Нормальные образцы для ударных испытаний

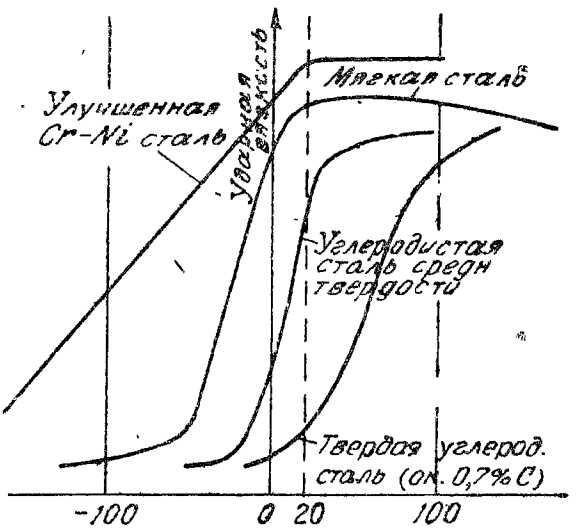


Рис. 89. Кривые зависимости ударной вязкости от температуры для различных углеродистых сталей и улучшенной хромоникелевой стали

ния не дают представления о степени этой чувствительности, то для ее обнаружения остаются только такие методы, как испытания образцов с надрезом, испытания непосредственно взрывом и металлографическое исследование.

Испытания надрезанных образцов осуществляются как ударные испытания на маятниковых копрах, причем применяются образцы, работающие либо на разрыв, либо на изгиб. Испытание надрезанных образцов на разрыв, позволяющее получить также величины удлинения и поперечного сужения при ударе, в физическом смысле является более определенным, чем испытание на изгиб. Однако последний вид испытания получил наиболее широкое распространение, вследствие большого удобства его проведения. В Германии, в настоящее время, в качестве стандартных приняты представленные на рис. 87 и 88 образцы сече-

нием 10×10 *мм*^{2}, с глубиной надреза в 3 *мм*. Наряду с этими образцами в стандарт входят и большие образцы сечением 30×30 *мм*^{2}, которые хотя и дают более показательные результаты, но могут применяться лишь в редких случаях.

Наиболее высокие значения ударной вязкости получаются, в тех случаях, когда материал дает чисто вязкий излом, т. е. когда полностью используется способность материала деформироваться. Но величина ударной вязкости становится весьма незначительной, если излом, вследствие применения низких температур или действия надреза, получает хрупкий характер. Если представить зависимость ударной вязкости от температуры испытания в виде кривой, то область температур, в пределах которых происходит указанное падение ударной вязкости, является показательной для характеристики склонности материала к образованию хрупкого излома.

Таким же образом и в отношении опасности разрыва ствола при стрельбе имеет значение не столько наибольшая величина ударной вязкости (которая для большинства сталей, если они не испорчены неправильной обработкой, является достаточной), сколько характер и положение переходного участка к области хрупкого излома материала, т. е. так называемого температурного критического интервала. Различие между кривыми ударной вязкости для хромоникелевой стали и углеродистых сталей с различным содержанием углерода показано на рис. 89.

4. Проведение ударных испытаний

Ввиду большого значения испытания надрезанных образцов не только в отношении ствольных сталей, но и вообще для материалов, применяемых при изготовлении вооружения (в частности для лафетных сталей), необходимо остановиться на рассмотрении вопроса о проведении этих испытаний [53]. Применение испытаний надрезанных образцов на разрыв для оценки высококачественных материалов заслуживает большего внимания, чем это имело место до настоящего времени. Эти испытания, равно как и подобные же испытания на изгиб, позволяют выявить переход от вязкого излома к хрупкому. На рис. 90, 91 и 92 для стали с 0,17% углерода, имеющей довольно крупно-зернистую микроструктуру, показаны кривые зависимости работы деформации от температуры при испытании надрезанных образцов как на разрыв, так и на изгиб, в случаях статического и ударного приложения усилий. Из приведенных

[53] *W. Schwinning.* Z. VDI, 73 (1929), S. 321.

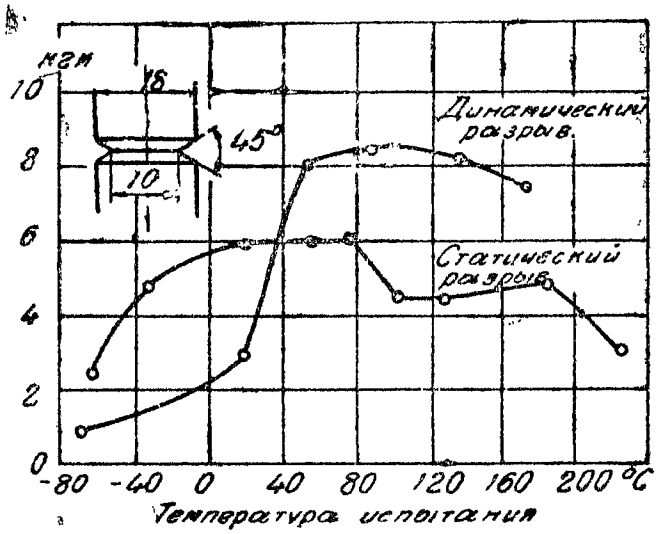


Рис. 90

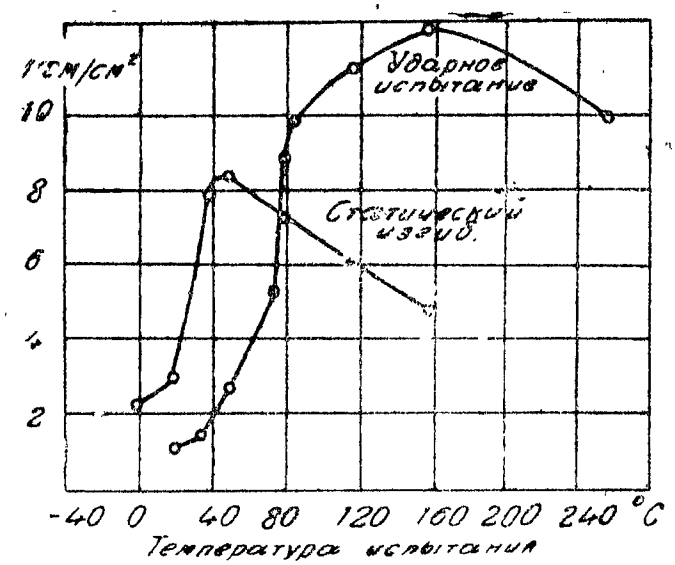


Рис. 91

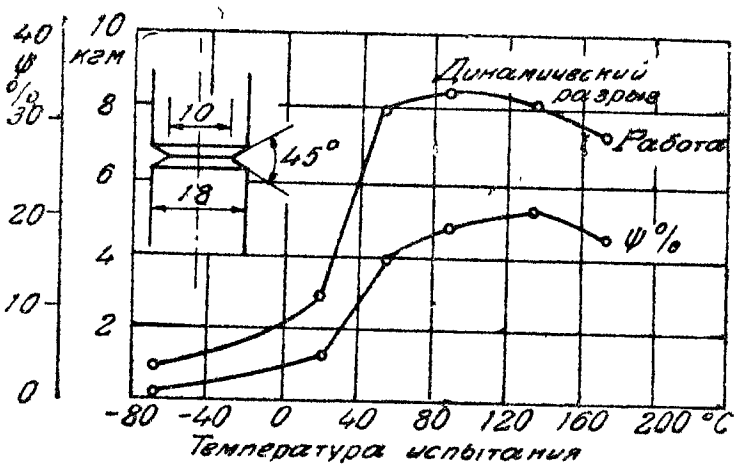


Рис. 92

Рис. 90—92. Зависимость от температуры испытания работы деформации при статическом и динамическом испытании на разрыв и на изгиб образцов с острым надрезом

Рис. 90. Работа деформации при испытании на разрыв

Рис. 91. Работа деформации, отнесенная к 1 $см^2$ (удельная вязкость), при испытании надрезанных образцов на изгиб

Рис. 92. Работа деформации и поперечное сужение ψ при динамическом испытании на разрыв

данных видно, что склонность к образованию хрупкого излома (переход в хрупкое состояние) при испытании на удар обнаруживается более резко, чем при статическом действии нагрузки. Поэтому испытания надрезанных образцов, имеющие целью вскрытие характерной для каждого материала хрупкости, всегда проводятся как ударные испытания. Испытания надрезанных образцов на разрыв позволяют использовать также результаты наблюдений, относящихся к поперечному сужению при разрыве (рис. 92)[54]. Для

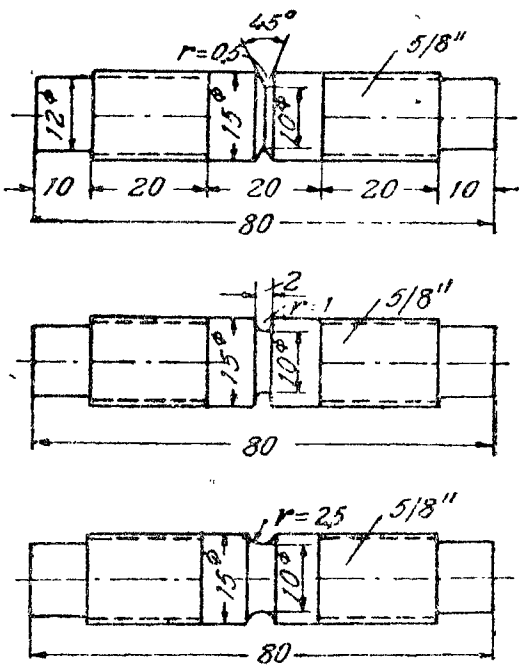


Рис. 93—95. Надрезанные образцы для испытания на разрыв

испытаний на разрыв автор предлагает образцы с формами надреза, показанными на рис. 93, 94 и 95.

Если бы при ударных испытаниях на разрыв удавалось производить определение величины динамического предела упругости или предела текучести, то эти испытания получили бы более важное значение. В этом направлении ведутся опыты в Дрездене, с использованием пьезоэлектрического способа измерения давлений.

Испытания надрезанных образцов на изгиб, которые являются скорее испытаниями технологического характера, имеют то преимущество, что их проведение отличается большей простотой, в особенности при температурах, более высоких или более низких, чем комнатная температура. В отношении этих испытаний уже имеется большой практический опыт.

---

[54] См. *H. Flössner.* Ueber die Festigkeitseigenschaften gekerbter Stäbe. Diss. Dresden, 1927.

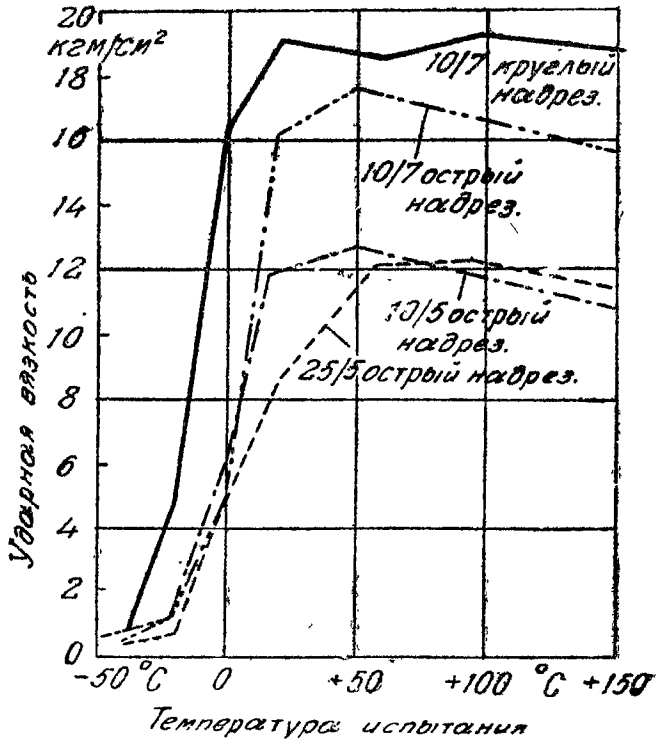


Рис. 96

Рис. 96 и 97. Влияние ширины образца и формы надреза на ударную вязкость образцов с надрезом при испытании на изгиб при различных температурах.

Рис. 96. Продольные образцы размерами 150×10,5 *мм*² из стали St 37

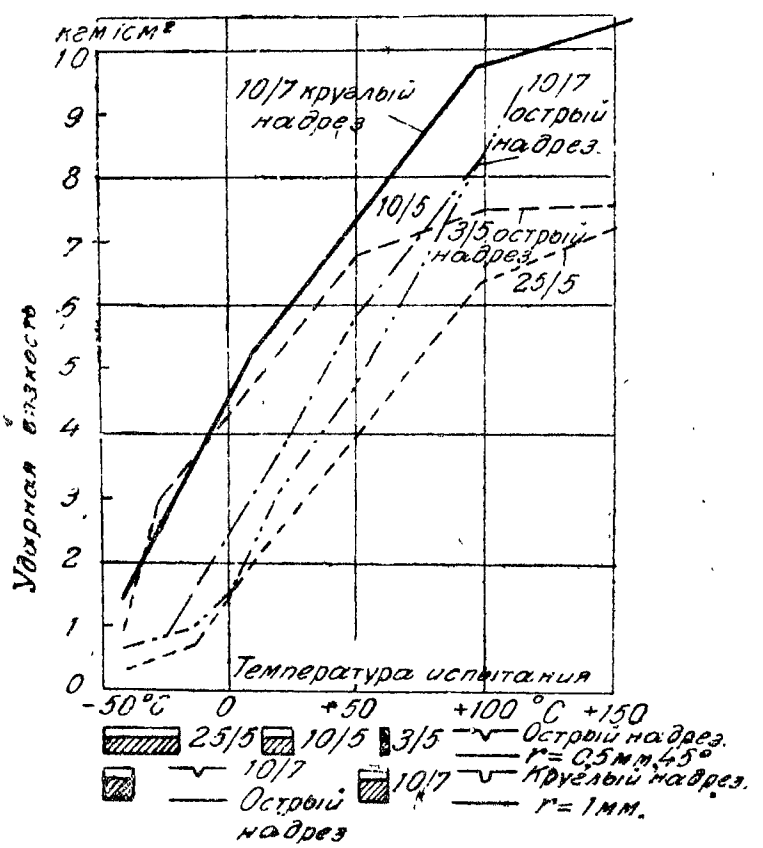


Рис. 97

Рис. 97. Продольные образцы, изготовленные из 10-*мм* листовой кремнистой стали, испорченной неправильной горячей обработкой

Численные величины ударной вязкости являются сравнимыми только при условии полной одинаковости образцов, т. е. при равных размерах и при одинаковой форме и глубине надреза. Если надрез имеет глубину, достаточную для того, чтобы обеспечить локализацию деформации в зоне у основания надреза, то любая форма образца является пригодной для выявления склонности материала к образованию хрупкого излома. Примером могут служить представленные на рис. 96 и 97 кривые зависимости между ударной вязкостью и температурой испытания образцов различной формы для стали St 37, металлургически здоровой и правильно прокатанной, и для листовой кремнистой стали, испорченной вследствие прокатки при недопустимой температуре. Хотя приведенные кривые показывают различные максимальные значения ударной вязкости, тем не менее принципиально эти кривые имеют одинаковый характер, что в особенности относится к области, переходной к хрупкому излому. Важным является только правильный выбор температур испытания и достаточное число опытов с образцами выбранной формы.

Для приемных испытаний желательна такая форма образца, которая позволяет отличить хороший материал от испорченного (т. е. склонного к хрупкому разрыву) в условиях комнатной температуры. Это положение, как правило, и имеет место, согласно опытным данным Кербера и др. в отношении нормальных образцов (рис. 87 и 88) для листовой котельной стали, мостовой конструкционной стали и т. д. Но для выявления свойств высококачественной хромоникелевой стали типа орудийной, по мнению автора, нельзя обойтись без испытаний при низких температурах (порядка -40°), как это можно видеть из сравнения кривых на рис. 89. В настоящее время, после того, как уже проведена стандартизация надрезанных образцов для ударных испытаний, не рекомендуется без особо побудительных причин отступать от установленных норм для обеспечения полной сравнимости результатов.

Конструктор должен всегда иметь в виду, что результаты испытаний на ударную вязкость не дают каких-либо численных величин, которые могли бы быть использованы при расчете конструкции. Эти испытания служат только для того, чтобы выявить и отделить безупречно вязкий материал от стали, испорченной неправильной термообработкой или имеющей другие металлургические пороки, в отношении которых обычные испытания на разрыв не дают никаких указаний.

Следовательно, ударные испытания надрезанных образцов являются весьма важным методом оценки качества орудийной стали.

В. Материал для изготовления стволов и его обработка

1. Углеродистая сталь

Сталь для изготовления орудийных стволов должна удовлетворять требованию сочетания высокого предела текучести и сопротивления разрыву с очень хорошей вязкостью при действии усилий динамического характера. Трудности в отношении удовлетворения этого требования возрастают с увеличением веса слитка. Предел текучести и сопротивление разрыву могут быть повышены за счет увеличения содержания углерода. Но для массивных поковок, применяемых в орудийном производстве, предел текучести получается все-таки значительно ниже, чем для катанных материалов, имеющих тонкие сечения. Так, например, для углеродистых сталей, содержащих примерно ок. 0,2;04 и 0,6% углерода, и нормальное количество марганца, Крупп дает следующие величины.

Сопротивление разрыву σ_B *кг/мм²*	Предел текучести σ_S малое/большое поперечн. сечение поковки *кг/мм²*	Удлинение при разрыве δ_{10} (для продольных образцов) малое/большое поперечн. сечение поковки %
45	от 30 до 22	от 24 до 20
60	„ 38 „ 28	„ 20 „ 16
70	„ 40 „ 30	„ 18 „ 14

Примерный вид кривых ударной вязкости для таких сталей (в случае среднего поперечного сечения) показан схематически на рис. 89. Эти кривые могут служить только для сравнительных целей, потому что ударная вязкость сталей зависит от степени укова, характера термической обработки и т. д. Из кривых можно видеть, что с увеличением содержания углерода, а следовательно с повышением предела текучести, опасность получения хрупкого излома значительно возрастает. Поэтому углеродистая сталь с сильно повышенным пределом текучести, будучи применена для изготовления орудийных стволов, представляет относительно большую опасность в смысле получения разрыва (вместо раздутия) при действии ненормально высокого давления газов.

В этом отношении поучительное значение имеют первые опыты, связанные с переходом от сварочного железа к стали. Фирмой Армстронг для изготовления стволов морской артиллерии в свое время применялось очень мягкое сварочное железо, имевшее сопротивление разрыву всего лишь ок. 36 *кг/мм*^{2}, а предел текучести — ок. 19 *кг/мм*^{2}, но отличавшееся высокой вязкостью. Опыты по замене этого железа литой сталью (углеродистой) с высоким пределом текучести сначала вызвали большое разочарование, вследствие разрывов стволов при стрельбе. Причина разрывов заключалась в том, что повышение характеристик прочности (σ_S, σ_B) происходило за счет значительного снижения вязкости, которое особенно сильно проявляло себя в то время, ввиду недостаточного опыта в деле изготовления крупных стальных поковок.

Правда, и для углеродистой стали (в особенности для изделий малого поперечного сечения) можно добиться значительного улучшения механических свойств путем хорошо проведенного процесса получения металла и тщательно выполненной ковки и термической обработки. Поэтому для изготовления винтовочных стволов вполне допустимо применение улучшенной углеродистой стали, особенно с несколько повышенным содержанием марганца. Что же касается крупных орудийных поковок, то, в случае применения углеродистой стали, от высокого предела текучести следует отказаться. В силу этого, поскольку приходится иметь дело с углеродистой сталью, орудийные заводы идут лишь на умеренных величинах предела текучести, а именно:

	Сопротивление разрыву *кг/мм*^{2}	Предел упругости или текучести *кг/мм*^{2}	Удлинение при разрыве %
Крупп	от 55 до 60	от 30 до 35	15
Виккерс	„ 54 „ 69	33	?

Но даже и при этих величинах предела текучести нельзя рассчитывать на получение вязкости, гарантирующей от разрыва ствола в случае детонирующего действия взрывчатого вещества.

2. Влияние марганца, кремния и хрома на свойства конструкционной стали

Неизбежность уменьшения вязкости стали при повышении характеристик прочности за счет увеличения содержания углерода привела к тому, что даже для мягких кон-

струкционных сталей, типа применяемых в мостостроении и т. п., переход от марки St 37 к марке St 52, характеризующийся повышением предела текучести с 24 *кг/мм*^{2} до 36 *кг/мм*^{2}, связан не с увеличением содержания углерода, а с введением специальных примесей в виде кремния, марганца и хрома, несмотря на то, что в данном случае приходится иметь дело не с крупными поковками, а с относительно тонкостенными катаными профилями. Этот опыт является поучительным, но не может быть непосредственно перенесен на случай крупных поковок, так как необходимо иметь в виду нижеследующее.

Марганец при содержании его в перлитной марганцовой стали от 1,0 до 1,8% повышает предел текучести без того значительного понижения вязкости, которые влечет за собой увеличение содержания углерода. В отношении повышения прочности стали, увеличение содержания марганца на 1%, примерно, равноценно 0,2% углерода. Марганец сообщает стали способность к улучшению и обусловливает получение перлита тонкого строения. Поэтому указанные стали с содержанием марганца от 1,0 до 1,8% применяются с выгодой для изготовления колесных бандажей, баллонов для сжатых газов, снарядов, шасси и т. п. Однако, полезное влияние марганца сказывается, главным образом, на качестве изделий, имеющих не слишком большое поперечное сечение. В случае же таких толстостенных изделий, как орудийные поковки, проницаемость закалки марганцовых сталей указанного состава оказывается недостаточной и тогда добавление марганца дает лишь ограниченный эффект.

Полезное влияние введения кремния до 1%, хорошо проверенное в отношении конструкционной стали St 52, в применении к сталям более высокой прочности экспериментально недостаточно выяснено. Изготовление кремнистых сталей связано с металлургическими трудностями, в особенности если на первый план выдвигается вопрос о прочности и вязкости в поперечном направлении,—как это и имеет место в отношении орудийных стволов. Но все же следует заметить, что для сталей, содержащих, кроме кремния, еще один специальный элемент (кремне-хромистых и др.,) можно рассчитывать на дальнейшие достижения. При этом, в отношении орудийных стволов должно быть проверено опытным путем, в какой мере отражается на износе вредное влияние уменьшения теплопроводности стали в связи с повышенным содержанием кремния.

Значительно более благоприятное влияние на свойства крупных поковок оказывает введение хрома. Примесь этого элемента повышает предел текучести и увеличивает проницаемость закалки (см. по этому поводу данные, отно-

сящиеся к шарикоподшипникам, бронебойным снарядам и т. д.), а следовательно и способность к улучшению массивных изделий, т. е. получение тонкой сорбитной структуры после закалки, примерно, при 850° с последующим отпуском при 600° — 650°. Закалка при указанной температуре дает структуру мартенсита, который затем, после отпуска при температуре несколько ниже нижней критической точки Ac_1, распадается на сорбит. Таким образом, для хорошо приготовленной и улучшенной хромистой стали можно получить, наряду с высоким пределом текучести, значительно большую вязкость в крупных поковках, чем это достигается за счет прибавления марганца. Но указанное сочетание свойств обусловливается относительно высоким содержанием хрома (от 1% до 2% — в зависимости от толщины поковки) и тщательным проведением всех металлургических процессов, так как хромистая сталь очень чувствительна к дефектам раскисления, горячей обработки давлением, отжига и проч. Эти соображения, касающиеся крупных поковок вообще, относятся полностью и к орудийным поковкам.

Дальнейшее повышение способности хромистой стали к улучшению достигается путем прибавления от 0,2 до 0,5% молибдена. Хромомолибденовая сталь применяется в США в качестве заменителя никелевой стали в автостроении. Из числа стандартных хромомолибденовых сталей с точки зрения орудийного производства заслуживают внимания следующие две марки:

Марка стали	C %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
			не более			
4140	0,35 — 0,45	0,40 — 0,70	0,04	0,045	0,80 — 1,10	0,15 — 0,25
4150	0,45 — 0,55	0,40 — 0,70	0,04	0,045	0,80 — 1,10	0,15 — 0,25

Автору неизвестно, применялись ли уже стали подобного типа в орудийном производстве. По его мнению можно рекомендовать еще повышение содержания хрома до 1,5 — 1,8%, а молибдена — до 0,25 — 0,40%, так как с увеличением количества этих элементов в стали имеет место повышение проницаемости закалки крупных поковок, а значит и способности их к улучшению. Сочетание же высокого предела текучести с хорошей вязкостью может быть достигнуто лишь для улучшенного состояния стали, характеризующегося структурой сорбита, а не для отожжен-

ного состояния. Прибавление молибдена хорошо себя оправдало в отношении теплостойкости для котельной листовой стали.

Преимущество этих сталей перед никелевой сводится лишь к вопросу стоимости.

3. Никелевая сталь

В качестве материала, обладающего высокой вязкостью в крупных поковках, можно прежде всего отметить никелевую сталь перлитного класса[55]. Чистая никелевая сталь, не содержащая других легирующих примесей, пригодна в частности как мягкая сталь с пределом текучести порядка 40 *кг/мм*^{2}.

Подобная сталь давно уже (до 1890 г.) нашла применение в качестве материала для орудийных стволов. Этот факт в свое время представлял громадное достижение, в связи с чем орудийное производство получило ведущую роль в деле применения специальных сталей в технике. Благодаря высокой вязкости улучшенной никелевой стали, Англия вплоть до мировой войны базировалась в основном на этом материале (впрочем Виккерс тогда уже изготовлял стволы и из улучшенной хромоникелевой стали, содержавшей 0,25% C, 3,6% Ni и 0,6% Cr).

Для повышения предела текучести никелевой стали до 45 *кг/мм*^{2} потребовалось введение в нее таких дополнительных специальных элементов, как хром, вольфрам и молибден. Прибавление ванадия в большом количестве обходится слишком дорого. Фирма Круппа явилась в свое время

---

[55] Никелевые, а также хромоникелевые стали, в зависимости от содержания легирующих элементов подразделяются на стали перлитного, мартенситного и аустенитного класса. В орудийном производстве в настоящее время приходится иметь дело только со сталями перлитного класса, структура которых после улучшения представляет собой тонкий сорбит. Хромоникелевые стали с высоким содержанием хрома (а также и других легирующих примесей), относящиеся к мартенситному и аустенитному классу, имеют большое техническое значение в качестве так называемых нержавеющих сталей. Наиболее сильно легированные, аустенитные стали не применяются в орудийном производстве, так как, не говоря уже об их высокой стоимости, они имеют слишком низкий предел текучести. Стали мартенситного класса, обладающие после отжига высокой твердостью и хрупкостью, путем специального способа термической обработки, заключающегося в отпуске при температуре ниже нижней критической точки, могут быть переведены в сорбитное состояние с присущими ему свойствами вязкости и умеренной твердости. Таким образом многие из сталей мартенситного класса возможно превратить в вязкие конструкционные стали, обладающие вместе с тем высоким пределом текучести. Подобные стали имеют крупное значение в общем машиностроении (например в турбиностроении). Автор не имеет сведений о попытках применения таких сталей в качестве орудийных. Если отбросить вопрос о стоимости, то эти стали могли бы найти применение для изготовления ляйнеров в орудиях высокой мощности.

первым предприятием, которое (ок. 1890 г.) ввело хромоникелевую сталь для орудийных стволов и броневых плит.

Введение указанных элементов в хромистые и никелевые стали позволяет в улучшенном состоянии достигнуть повышения предела текучести при хорошей вязкости. Химический состав должен находиться в соответствии с требуемыми механическими свойствами и размерами ствола. В довоенное время Крупп применял для изготовления броневых плит и орудийных стволов хромоникелевую сталь, содержавшую от 1,5 до 2,0% хрома и от 3 до 4% никеля, а Эрхардт — вольфрамоникелевую сталь, с содержанием никеля от 5 до 7%, которая обладала очень высоким пределом текучести. Из этих сталей немецкими заводами изготовлялись по заказам различных государств полевые пушки и другие орудия. Все эти орудия без исключения хорошо зарекомендовали себя, как в отношении живучести (стойкости против износа), так и в отношении безопасности при разрывах.

Высокие механические свойства указанных хромоникелевых и вольфрамоникелевых сталей получаются только после улучшения, состоящего из закалки и отпуска. Эти свойства можно изменять в довольно широких пределах в зависимости от способа улучшения, а в особенности — за счет величины температуры отпуска.

Для хромоникелевой стали, содержащей 1,90% Cr и 4,36% Ni (марка VCN 45), зависимость предела текучести, сопротивления разрыву и характеристик пластичности и ударной вязкости от температуры отпуска представлена в виде кривых на рис. 98. Приведенные данные относятся к круглому штанговому материалу диаметром 50 *мм*. Для крупных поковок типа орудийных значения предела текучести будут несколько ниже, но характер влияния температуры отпуска останется тем же самым. Если преимущественное значение имеет требование безопасности от разрыва, а следовательно и высокой вязкости, то следует рекомендовать после закалки от 820 — 850° в масле отпуск при температуре ок. 650°. При этом для хромоникелевой стали в крупной поковке можно без труда получить предел текучести от 50 до 60 *кг/мм*^{2}. Эту величину можно значительно повысить путем назначения более низкой температуры отпуска и посредством увеличения содержания никеля, хрома или других легирующих элементов. Но тогда придется считаться с соответствующим уменьшением ударной вязкости. Подобный метод повышения предела текучести можно рекомендовать для тонкостенных сменяемых ляйнеров, которые должны обладать высокой стойкостью против износа. Но при этом толстостенная внутренняя труба (оболочка) и наружные слои должны быть изготовлены из очень вязкой улучшенной стали.

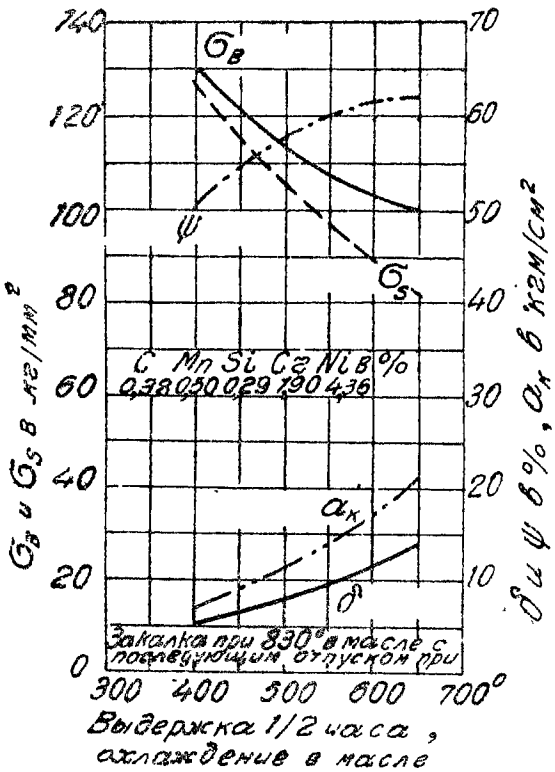


Рис. 98. Зависимость механических свойств хромоникелевой стали от температуры отпуска при улучшении

(По Эртелю)

Безопасность при разрыве для хромоникелевой стали характеризуется кривыми ударной вязкости, представленными на рис. 89 и 99, из которых видно, что минимальные значения последней получаются лишь при очень низких температурах (для вязкой орудийной стали ниже — 100°). Именно в этом обстоятельстве, а не только в величине ударной вязкости при комнатной температуре, заключается характерная особенность улучшенной хромоникелевой стали. Ведь одинаковую ударную вязкость при комнатной температуре можно получить также и от углеродистой стали (впрочем, с соответственно пониженным пределом текучести), но последнюю никоим образом нельзя будет отнести к числу вязких при разрыве материалов. Существенное различие соответствующих кривых показано на рис. 89.

Различное поведение этих сортов стали при взрывной пробе цилиндра, состоящего из двух слоев, видно из рис. 100. Внутренний слой из хромоникелевой стали был вставлен в наружный цилиндр (кожух) из углеродистой стали, обладавшей такой же величиной удлинения при разрыве, как и хромоникелевая сталь. Взрывная проба, произведенная путем детонации гранаты внутри цилиндра, привела только к раздутию внутреннего слоя, в то время как кожух разорвался на большое число осколков.

Большим преимуществом хромоникелевой стали является хорошая проницаемость закалки, а в связи с этим — способность к равномерному улучшению даже при значительном поперечном сечении заготовки, ибо процесс улучшения заключается в переводе перлита в мартенсит при закалке, а затем в превращении последнего в сорбит посредством последующего отпуска при температурах от 550° до 650°. Таким образом углубление закалки вплоть до сердцевины является необходимой предпосылкой для получения „сквоз-

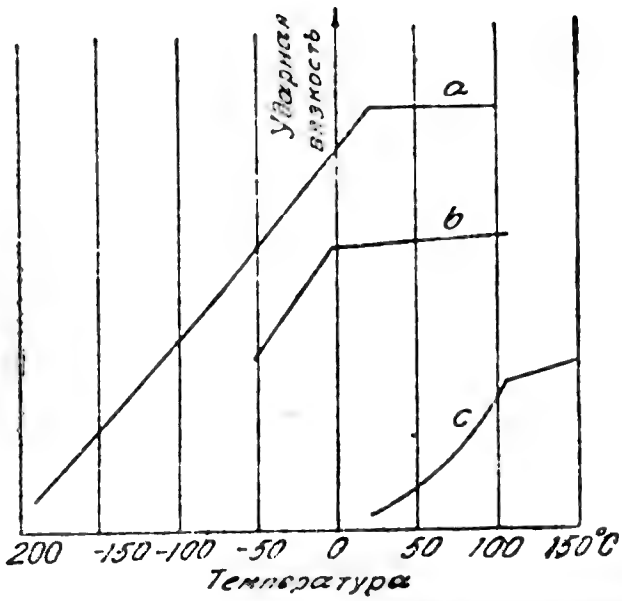


Рис. 99. Ударная вязкость хромоникелевой стали в зависимости от температуры испытания (образцы поперечные)

a безупречный материал с очень высокой ударной вязкостью
b материал с пониженной вязкостью, вследствие неправильной термической обработки или других ошибок на производстве
c материал испорченный, с резко выраженной хрупкостью

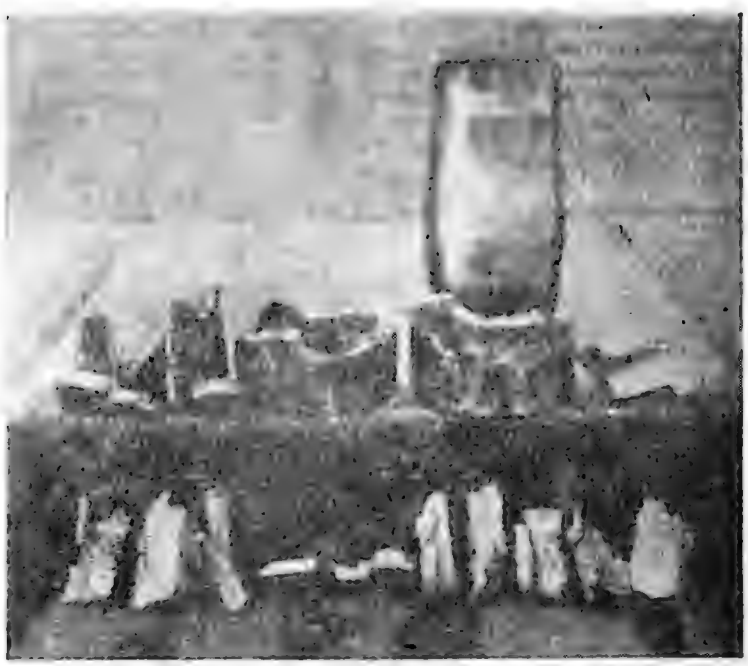
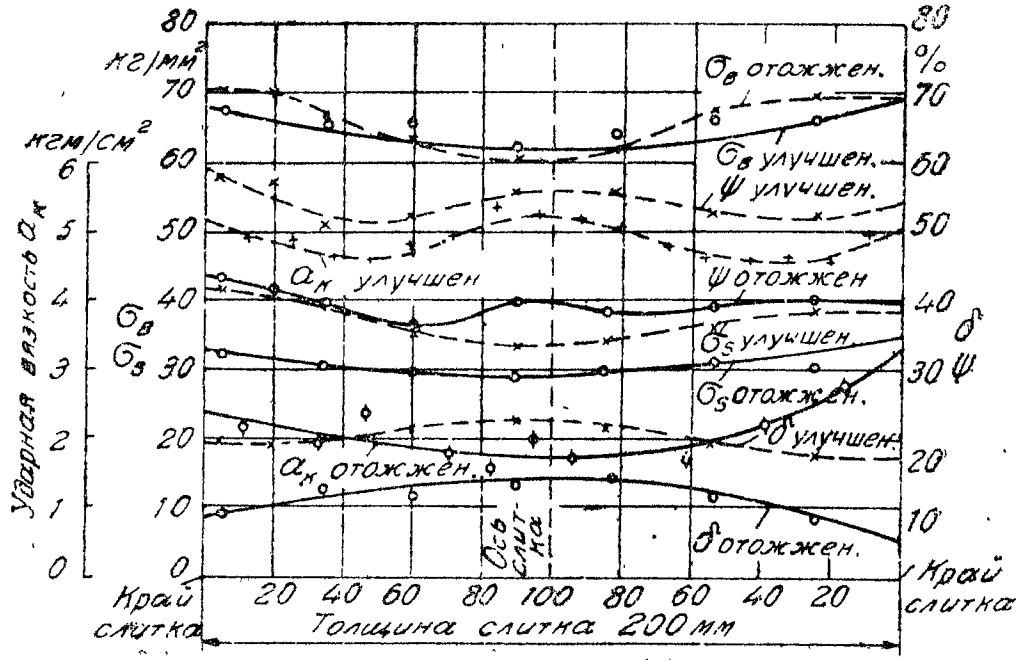


Рис. 100. Опыты по разрыву двухслойного цилиндра. Внутренний слой из улучшенной хромоникелевой стали, наружный слой — из углеродистой стали

ного" улучшения. Достижение последнего для углеродистой стали не представляется возможным.

Характерными в этом отношении являются исследования, проведенные для выяснения влияния улучшения на свойства поковок диаметром в 200 *мм* из углеродистой и хромоникелевой стали [56]. На рис. 101 и 102 представлены в графическом виде результаты исследования, т. е. величины предела текучести, сопротивления разрыву, удлинения, поперечного сужения и ударной вязкости, определенные

[56] Опыты были проведены еще в 1921 г. по предложению автора д-р инж. *Шюрманом* в Институте металлургии и материаловедения при Дрезденской высшей технической школе. Стальные поковки были представлены фирмой Круппа.



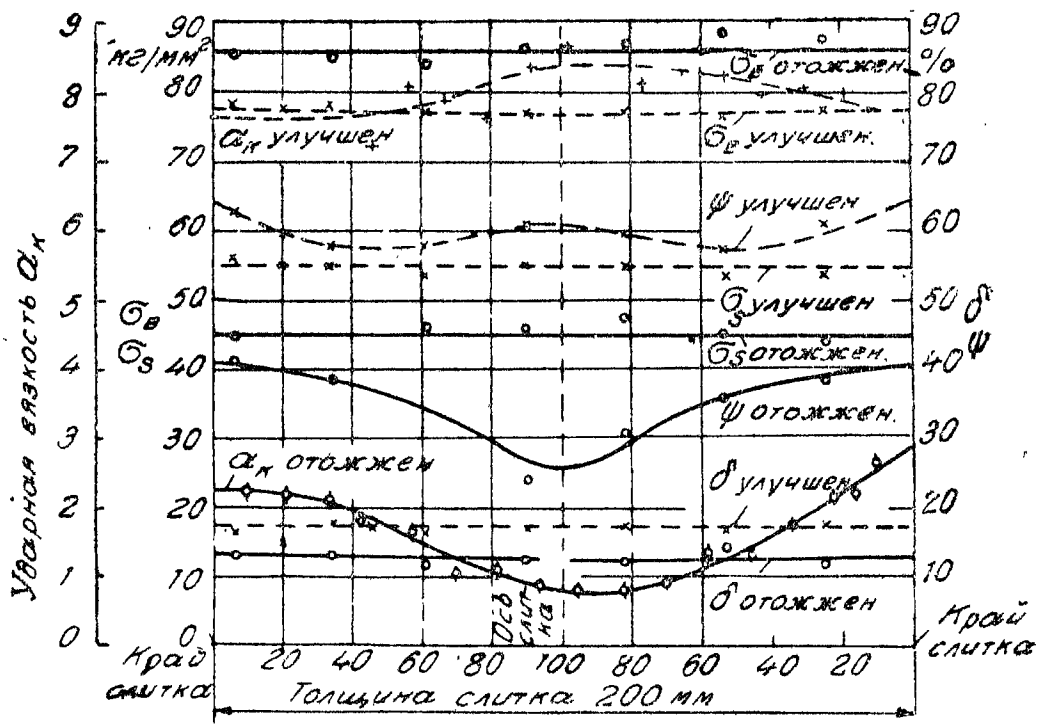


Рис. 101 и 102. Изменение механических свойств по сечению поковки диаметром 200 *мм* в отожженном и улучшенном состоянии

Рис. 101. Углеродистая сталь состава: 0,50% C; 0,6% Mn; 0,37% Si; 0,017% P; 0,016% S; 0,2% Cu

Рис. 102. Хромоникелевая сталь состава: 0,53% C; 1,73% Cr; 2,68% Ni; 0,46% Mn; 0,85% Si; 0,01% P; 0,033% S; 0,21% Cu

на продольных образцах, взятых из различных слоев поковок. Ударная вязкость определялась при комнатной температуре на образцах сечением 10×10 *мм*^{2} с круглым надрезом глубиной 5 *мм*.

Отжиг поковок заключался в медленном нагреве до 670—680°, выдержке при этой температуре в течение четырех часов и последующем медленном охлаждении в горячей золе (продолжительность охлаждения составляла ок. 24 час.).

Процесс улучшения поковок состоял в очень медленном нагреве до 850° и закалке от этой температуры в масле, с последующим отпуском в соляной ванне, заключившимся в очень медленном нагреве до 640—650°, выдержке при этой температуре от 6 до 8 часов и охлаждении с различной скоростью для углеродистой и хромоникелевой стали. В то время как первая сталь подвергалась медленному охлаждению, вторая сталь, после охлаждения ее с печью до 630°, быстро погружалась в масло.

Структуры сталей в различных состояниях показаны на рис. 103—107. Для хромоникелевой стали в результате улучшения была получена равномерная структура тонкого сорбита, одинаковая по всему сечению поковки (рис. 103). Структура углеродистой стали и после улучшения осталась состоящей из перлита и феррита, хотя и более тонкого строения, — что в особенности относится к перлиту. Как видно из сопоставления микрофотограмм рис. 106 и 107, влияние улучшения сказалось значительно слабее на сердцевине, чем на периферии поковки. Следовательно, улучшение структуры в столь массивной поковке может быть осуществлено лишь в ограниченной мере. В соответствии с этим находятся и результаты механических испытаний, приведенные на рис. 101 и 102. Величина предела текучести, а в особенности ударной вязкости, после улучшения хромоникелевой стали возрастает более значительно, чем в случае углеродистой стали. При этом обращает на себя внимание то обстоятельство, что в поковке хромоникелевой стали, в противоположность углеродистой стали, предел текучести сохраняет постоянную величину по всему сечению. Напротив того, в отношении удлинения при разрыве улучшение хромоникелевой стали преимуществ по сравнению с углеродистой сталью не дает.

Таким образом, хотя улучшение углеродистой стали в случае крупных поковок и не является безрезультатным, тем не менее оно дает значительно меньший эффект, чем для хромоникелевой стали. Поэтому представляется сомнительным, оправдывается ли увеличение стоимости, связанное с процессом улучшения, тем повышением свойств, которое достигается при этом для углеродистой стали. Что же касается хромоникелевой стали, то достижение ею вы-

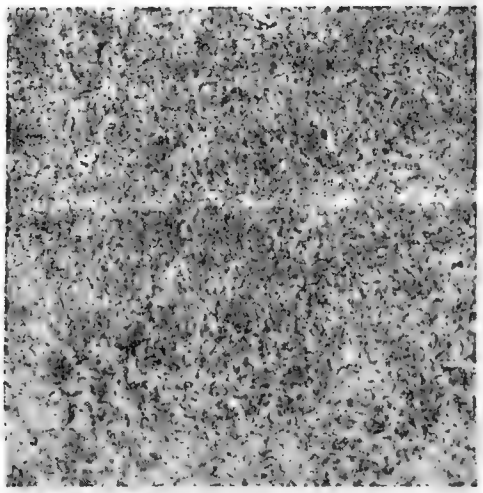


Рис. 103

Рис. 103. Структура улучшенной хромоникелевой стали (см. рис. 102), одинаковая на периферии и в сердцевине

Ув. 500, ум. на $^2/_3$

Рис. 104 — 105. Структура отожженной углеродистой стали (см. рис. 101)

Рис. 104 — периферия
Рис. 105 — сердцевина

Ув. 500, ум. на $^2/_3$

Рис. 106 — 107. Структура улучшенной углеродистой стали (см. рис. 101)

Рис. 106 — периферия
Рис. 107 — сердцевина

Ув. 500, ум. на $^2/_3$

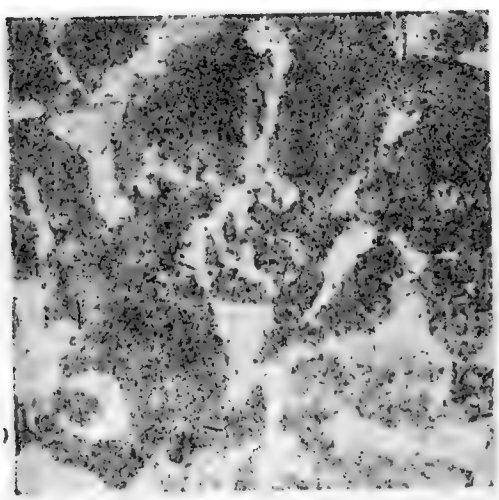


Рис. 104

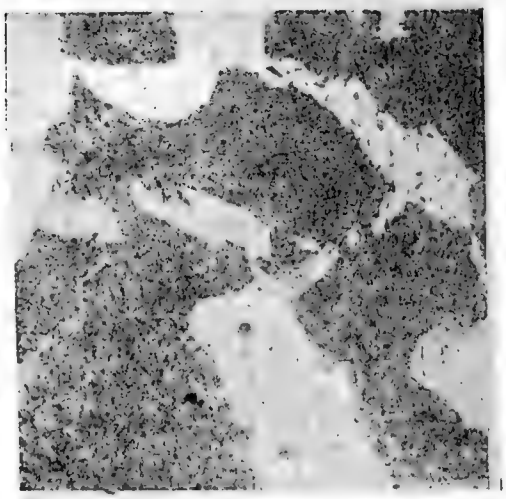


Рис. 105

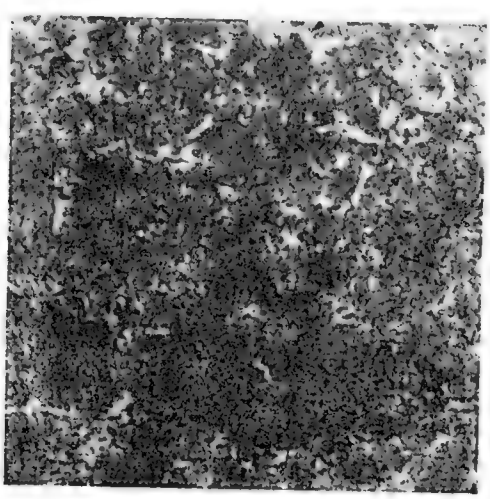


Рис. 106

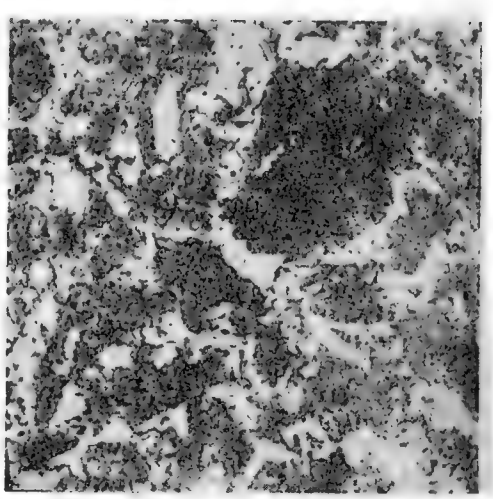


Рис. 107

соких механических свойств обязано именно только процессу улучшения, а потому экономически было бы нецелесообразным применять эту сталь в отожженном, а не в улучшенном состоянии. Сказанное имеет особенно важное значение в применении к крупным поковкам. В случае же малых поперечных сечений, например, в отношении винтовочных стволов, можно с успехом применять улучшение также и для углеродистой стали, в особенности при повышенном содержании в ней марганца.

Содержание хрома и никеля должно находиться, разумеется, в соответствии с толщиной поковки и требуемыми свойствами стали. С уменьшением содержания никеля понижается проницаемость закалки и вместе с тем способность к улучшению, что особенно сказывается на вязкости в случае большого сечения поковки. Стали, предлагаемые в качестве заменителей хромоникелевой стали, только в том случае могут получить правильную сравнительную оценку в отношении свойств, если подвергнутые улучшению образцы имеют такие же размеры, как и те детали конструкции, для изготовления которых эти стали предназначаются.

Изделия из хромоникелевой стали, подвергнутые медленному охлаждению после отпуска (при улучшении), нередко характеризуются так называемой отпускной хрупкостью, т. е. очень низкой величиной сопротивления при испытании на удар надрезанных образцов. Отпускной хрупкости можно избежать посредством быстрого охлаждения после отпуска в масле, но при этом в стали возникают остаточные напряжения. Для устранения последних необходим повторный отпуск при температуре от 400—500° с последующим медленным охлаждением [57].

В целях предупреждения самой возможности возникновения отпускной хрупкости, в хромоникелевую сталь, например, марки VCN 35 (применяемую, например, для крупных судовых валов) вводится от 0,2 до 0,4% молибдена. Добавка молибдена хорошо оправдала себя как в отношении уменьшения трудностей при термической обработке хромоникелевой стали, так и в отношении улучшения проницаемости закалки крупных поковок из этой стали. Автор не располагает сведениями, в какой мере хромоникелемолибденовая сталь нашла применение в орудийном производстве. Но известно, что в США для изготовления броневых плит применяется никелемолибденовая сталь, примерно, следующего состава: 0,2—0,4% углерода, 0,2—0,4% молибдена, 3—5% никеля, 0,15—0,25% кремния и 0,30—0,45% марганца.

---

[57] См. *H. Bühler*. Mitt. Forsch. Inst. verein. Stahlwerke. Dortmund, Bd. 2 (1931) Lieferung 8, S. 149.

Все улучшенные, т. е. сорбитные хромоникелевые стали имеют еще то преимущество перед обыкновенной углеродистой сталью, что они обладают очень незначительной склонностью к хрупкости при старении. Если углеродистую сталь подвергнуть холодной пластической деформации на растяжение или на сжатие, а затем предоставить этой стали длительный отдых или нагреть ее, примерно, на 200° с небольшой выдержкой при этой температуре, то после этого происходит заметное увеличение предела текучести по сравнению с тем значением, которым сталь характеризовалась непосредственно сразу после деформации. Но при

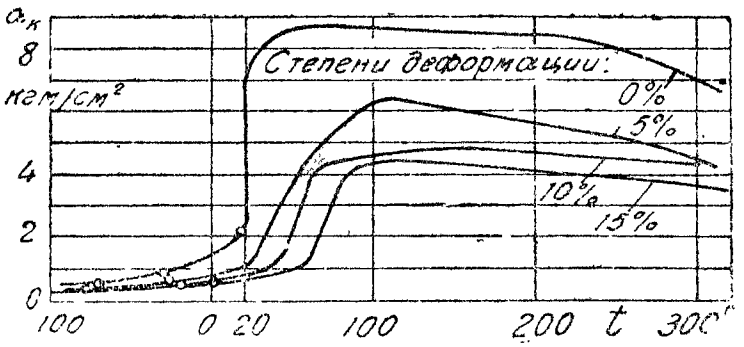


Рис 108. Влияние наклона и старения на ударную вязкость стали St 52 (0,10% C; 0,58% Mn; 1,45 Si) при степенях пластической деформации от 0 до 15%

этом одновременно наблюдается падение ударной вязкости; следовательно, склонность к хрупкому излому чрезвычайно возрастает и тем в большей мере, чем более значительной была предшествовавшая пластическая деформация (см. рис. 108). Наклепанная углеродистая сталь обладает резко выраженной хрупкостью. В хромоникелевой стали столь характерного проявления хрупкости при наклепе и старении не наблюдается, так как падение ударной вязкости для этой стали не выходит из очень узких пределов.

Повышение предела текучести углеродистой стали при наклепе с успехом используется в применении к тонкой проволоке. Что же касается орудийных поковок из углеродистой стали, то переход в хрупкое состояние наклепанной зоны следует признать рискованным, так как это состояние представляет значительную опасность в смысле возникновения трещин. Автор убежден также, что повышением твердости в результате наклепа нельзя достигнуть увеличения стойкости стали против износа (см. стр. 126). Приведенные соображения следует учитывать в отношении автофретажа, при применении которого прежде всего нужно иметь в виду такие материалы, как никелевую или хромоникелевую сталь, — в особенности в том случае, когда деформация трубы достигает столь значительной величины, что, наряду с возникновением остаточных напряжений в стенке, внутренний слой последней переходит в сильно наклепанное состояние.

4. Влияние методов изготовления и обработки стали

В результате ковки орудийного слитка происходит уменьшение величины зерна и в связи с этим улучшение механических свойств. В США ведутся опыты по изготовлению орудийных труб и железнодорожных колес методом центробежной разливки, в целях замены операции ковки. Хотя литературные данные[58] и указывают на значительное улучшение, достигаемое в результате применения этого метода, по сравнению с обычным литьем, тем не менее опубликованных до настоящего времени исследований недостаточно, чтобы можно было вынести окончательное суждение о применимости метода и о возможности замены им ковки орудийных труб.

Свойства орудийной стали зависят от степени укова. Поэтому французское морское ведомство предписывает определенные нормы для степени укова (под которой разумеется отношение площади поперечного сечения слитка к площади поперечного сечения готовой поковки), а именно: для внутренних труб требуется не менее, чем четырехкратный уков, а для остальных элементов ствола, кожуха и т. д. при известных условиях допускается $2^1/_2$-кратный уков.

Таблица 13. Соотношение механических свойств в поперечном и продольном направлении

	Углеродистая сталь (ср. рис. 101)				Cr—Ni сталь (ср. рис. 102)	
	Поковка диаметром 200 *мм*		Поковка диаметром 100 *мм*		Поковка диаметром 200 *мм*	
	отожженн.	улучшенн.	отожженн.	улучшенн.	отожженн.	улучшенн.
Сопротивление разрыву	0,97	0,99	1,0	0,93	1,0	0,98
Предел текучести	0,90	0,99	1,0	0,88	0,96	0,87
Удлинение	0,56	0,63	0,59	(0,4)	0,44	0,66
Поперечное сужение	(0,32)	0,60	0,55	0,58	0,53	0,65
Ударная вязкость при 20°. . . .	(0,7)	0,4	0,2	0,2	—	0,5

[58] *F. C. Dickson.* Trans. Amer. Soc. Stl. Treat. 18 (1930), p. 212/40. Извлечение см. в Stahl u. Eisen 51 (1931), S. 1479.
J. D. Knox. Steel. 92 (1933), p. 11 — 26. — Извлечение в Stahl u. Eisen 53 (1933), S. 654.

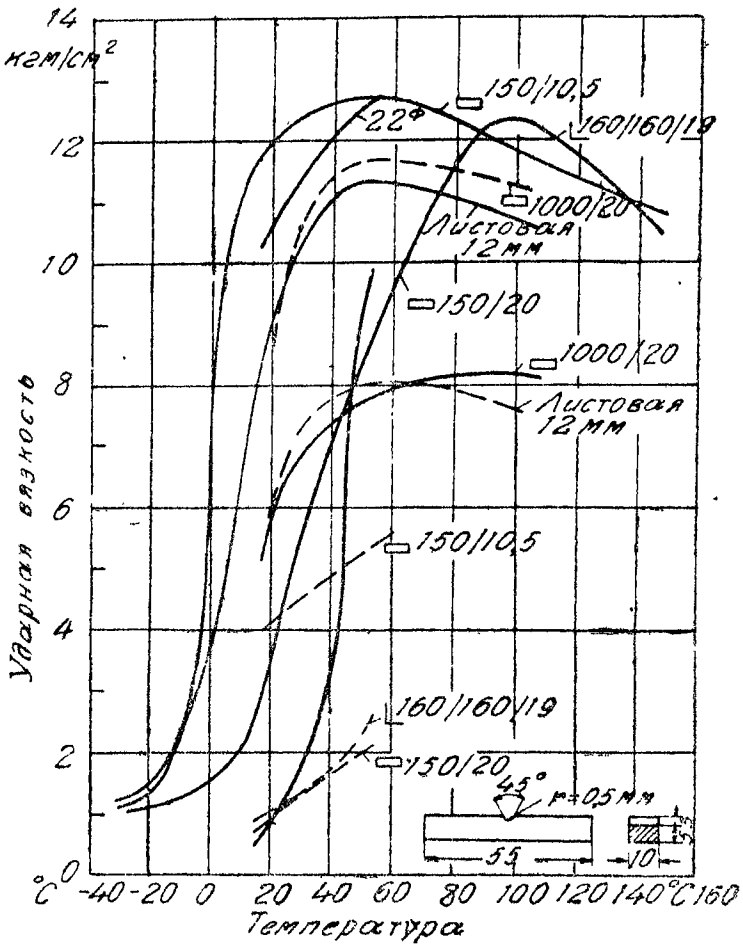


Рис. 109. Ударная вязкость в зависимости от температуры испытания в продольном и поперечном направлениях для стали St 37, прокатанной на различные профили

———————— продольные образцы
— — — — — — поперечные образцы

В результате ковки происходит улучшение свойств, главным образом в продольном направлении (т. е. в направлении вытяжки). Так как при ковке получается волокнистая структура, то между свойствами стали в продольном и поперечном направлении создается разница, которая, как правило, будет тем больше, чем больше степень укова. Это различие сказывается главным образом на свойствах пластичности (удлинение, поперечное сужение), а в особенности на ударной вязкости, — в то время как характеристики прочности (σ_S, σ_B) в продольном и поперечном направлении различаются между собою очень мало.

В качестве примера в таблице 13 приведены средние значения отношений характеристик механических свойств в поперечном направлении к соответствующим характеристикам в продольном направлении для отожженных и улучшенных поковок из углеродистой и хромоникелевой

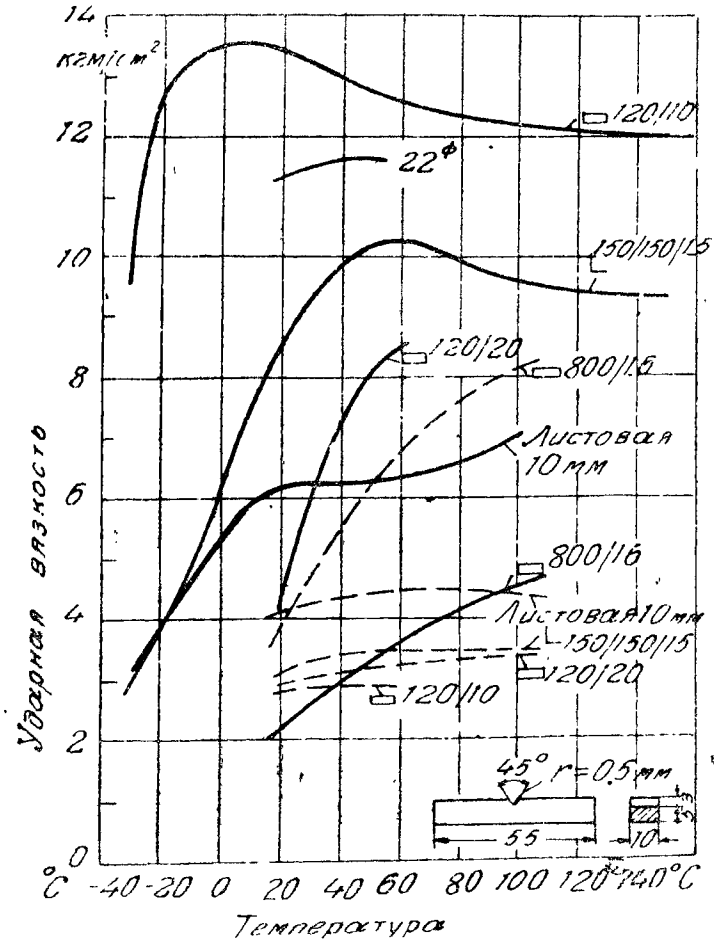


Рис. 110. Ударная вязкость в зависимости от температуры испытания в продольном и поперечном направлениях для стали St 52, прокатанной на различные профили

———— продольные образцы
— — — — — поперечные образцы

стали, свойства которых при толщине в 200 *мм* были представлены в графическом виде на рис. 101 и 102. Для углеродистой стали даны также относительные числа для поковки, укованной до диаметра 100 *мм*. Эти данные показывают, что различие в свойствах образцов, взятых в поперечном и продольном направлениях, и в особенности в значениях ударной вязкости, возрастает вместе с увеличением укова [59].

Но величина ударной вязкости, а также различие между ее значениями в поперечном и продольном направлении, зависит не только от степени укова, но и от характера деформации при обработке давлением. Для выявления этого различия обыкновенные испытания при комнатной температуре являются недостаточными. Требуется определение

[59] Ср. *E. Maurer* u. *H. Korschan*. St. u. Eis. 53 (1933 г.), S. 209, 243, 271.

для различных профилей кривых ударной вязкости в зависимости от температуры испытания, так как только эти кривые позволяют установить различную склонность материала к хрупкому излому. Подобного рода исследования были проведены автором для сталей St 37 и St 52. Полученные кривые, представленные на рис. 109 для стали St 37 и на рис. 110 для стали St 52, позволяют сделать сопоставление между результатами испытания поперечных и продольных образцов, вырезанных из катанных заготовок различного сечения (характер профиля показан на рисунках около соответствующих кривых). Из рассмотрения этих кривых вообще следует, что как значения ударной вязкости в продольном направлении, так и различие между поперечными и продольными образцами, достигают наибольших величин для профилей, получивших наибольшую степень деформации при прокатке. Но вместе с тем эти же кривые показывают, что ударная вязкость, а особенно склонность к хрупкому излому, сильно зависит от характера обработки. В этой области необходимо проведение дальнейших исследований в отношении других сталей.

Учитывая то обстоятельство, что вязкость в поперечном направлении, как это видно из рис. 109 и 110, понижается тем в большей степени, чем большую вытяжку в продольном направлении получила сталь, автор считает полезным в отношении поперечной ударной вязкости производить ковку таких элементов, как кольца для орудийного ствола и пустотелые изделия для других целей, на оправке, так как при этом получается более сильная вытяжка в тангенциальном направлении.

При приемке орудийных стволов по качеству металла механические испытания следует производить на поперечных образцах, что имеет особо важное значение в отношении таких характеристик, как удлинение, поперечное сужение при разрыве и ударная вязкость.

5. Влияние неправильной термической обработки

Свойства легированной стали, безупречной по своему химическому составу, могут быть значительно ухудшены в результате неправильного теплового режима при ковке, отжиге, а также при улучшении. Как раз особенно чувствительными в этом отношении являются высококачественные хромоникелевые и другие стали. При этом, если подобная сталь окажется испорченной при горячей обработке, то ухудшение ее качества скажется не на пределе текучести и сопротивлении разрыву, и даже не на величине удлинения, которая может оказаться удовлетворяющей техническим условиям, — а на развитии хрупко-

сти, проявляющей себя при действии усилий ударного характера. Это наиболее резко обнаруживается при испытаниях на ударную вязкость, которая, в зависимости от степени порчи при обработке, либо понижается на большую или меньшую величину, либо падает до ничтожного значения, свидетельствующего о полном переходе стали в хрупкое состояние. Примером могут служить кривые рис. 99, показывающие ударную вязкость безупречно вязкого материала и влияние на нее не вполне правильной тепловой обработки, а также полной порчи того же материала. Хотя ударная вязкость материала *b* несколько понизилась, тем не менее он не представляет еще опасности в случае повышения давления газов в канале ствола. Материал *c*, напротив, имеет кривую ударной вязкости, ясно указывающую на его хрупкое состояние, и, следовательно, уже при небольшой пластической деформации ствола, изготовленного из этого материала, вполне реальной является опасность разрыва.

Весьма опасные последствия может повлечь за собою наличие в подобном дефектном материале остаточных напряжений, обусловленных недостатками термического режима при улучшении. В этом случае, даже при нормальном давлении газов при выстреле, возможно образование трещины в стволе, если только указанные напряжения, складываясь с напряжениями, вызванными давлением газов, в каком-либо месте стенки дают результирующие напряжения, превосходящие предел текучести.

Если дефектность материала не является местным явлением, а относится ко всей массе изделия, то, независимо от того, вызвана ли эта дефектность условиями изготовления или неправильной тепловой обработкой, она может быть выявлена путем ударных испытаний надрезанных образцов (как на изгиб, так и на разрыв). Для этого в большинстве случаев оказываются достаточными уже приемные испытания при комнатной температуре. Однако, в отношении высококачественных никелевых или хромоникелевых сталей, от которых требуется высокая вязкость, рекомендуется производство дополнительного ударного испытания надрезанных образцов при температуре минус 40°, так как при этой температуре хорошая хромоникелевая сталь не должна еще переходить в хрупкое состояние, показывая лишь некоторое умеренное понижение ударной вязкости. Это испытание может быть проведено без труда даже в качестве приемного. Образцы при этом подвергаются охлаждению в спирте, или лучше в ацетоне, желаемая низкая температура которых достигается за счет введения твердой углекислоты; затем образцы быстро закладываются в подготовленный для удара копер и немедленно ломаются. Таким

образом, постановка испытания не представляет никаких затруднений.

6. Влияние неоднородности материала и местных пороков

Ударные испытания надрезанных образцов, однако, в ряде случаев оказываются недостаточными для надежного выявления непригодности материала. Это относится именно к тем случаям, когда материал подвергся неравномерной порче, в результате которой, в общей, довольно вязкой, массе имеются отдельные участки местной хрупкости и неоднородности или места с пороками. Обнаружение указанных местных дефектов требует, по меньшей мере, применения детального металлографического анализа. Значение же этих пороков очень велико, так как, несмотря на общее вязкое состояние материала, они могут послужить причиной хрупкого излома изделия. Подобные, локализированные неоднородности материала могут остаться не вскрытыми при ударной пробе, ибо последняя производится на образцах, взятых из отдельных мест, возможность совпадения которых с дефектными участками имеет случайный характер.

Значительного интереса заслуживает в этом отношении сравнение между результатами испытаний на ударную вязкость с одной стороны, и поведением материала при взрывной пробе, применявшейся в Германии во время войны, с другой. Эта проба, согласно техническим условиям, состояла в том, что в цилиндре длиной ок. 3/4 *м*, отрезанном от ствола полевой пушки, производился детонирующий разрыв гранаты. Вполне безупречный в отношении вязкости материал выдерживал эту пробу без образования трещин. В случае недостаточной вязкости, сначала наблюдалось, как это показано на рис. 111, появление трещин. Наконец, при совершенно неудовлетворительном качестве материала происходило сильное раздутие с образованием сквозных трещин (рис. 112 и 113) или даже полный разрыв цилиндра на отдельные осколки (рис. 114). При такой пробе производится испытание на вязкость весьма значительного куска материала, а не небольшого участка, как это имеет место при обычных испытаниях отдельных образцов. На диаграммах рис. 115 и 116 сопоставлены статистически обработанные результаты определения ударной вязкости как для труб, выдержавших взрывную пробу без появления трещин, так и для труб, давших при этой пробе сквозные трещины или разорвавшихся на осколки. Принимая за $100^0/_0$ число всех труб первой группы (рис. 115) или второй группы (рис. 116), на приведенных диаграммах показаны в виде ординат выраженные в $^0/_0{}^0/_0$ числа труб, отвечающие различным значениям ударной вязкости. Определение последней

Рис. 111

Рис. 112

Рис. 113

Рис. 114

Рис. 111—114. Вид цилиндров после испытания взрывной пробой

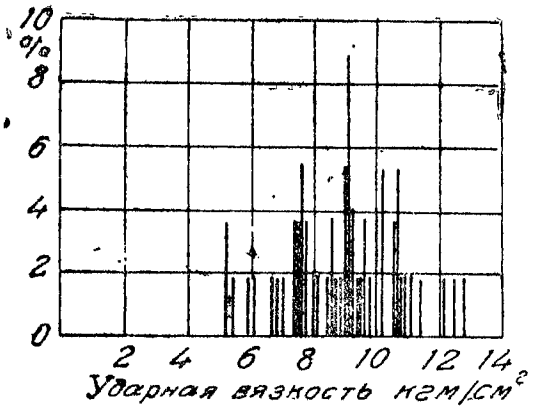


Рис. 115. Распределение труб, выдержавших испытания взрывной пробой без трещин, по значениям ударной вязкости

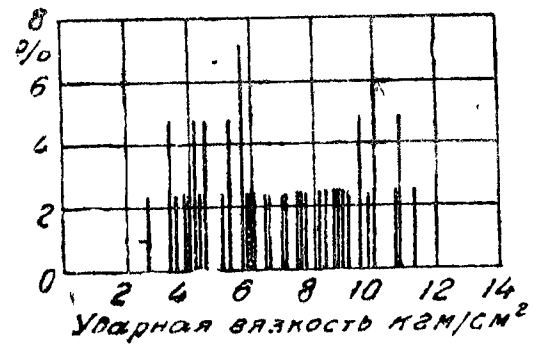


Рис. 116. Распределение труб, не выдержавших испытания взрывной пробой, по значениям ударной вязкости

производилось при комнатной температуре. Форма образцов была во всех случаях одинаковой, но она отличалась от принятых в настоящее время стандартных форм, показанных на рис. 87 и 88. Таким образом, приведенные значения ударной вязкости сравнимы только между собой и не могут сравниваться с величинами, определяемыми при испытании образцов современной формы.

Из представленных на рис. 115 и 116 диаграмм видно, что худшие результаты при испытании взрывной пробой в общем действительно согласуются с пониженными значениями ударной вязкости. Но, вместе с тем, в каждой из групп имеет место столь значительное рассеивание этих значений, что наибольшие величины ударной вязкости второй группы на много превосходят наименьшие величины первой группы. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в обеих группах имеется не по одному максимуму, а по несколько максимумов и минимумов. Это обстоятельство является следствием зависимости ударной вязкости от большого числа влияющих на нее факторов (химический состав стали, более или менее полное ее раскисление, степень укова, условия улучшения и т. д.).

Перекрытие численных значений ударной вязкости в обеих группах показывает, что для оценки отношения металла к взрывной пробе не могут быть указаны какие-либо определенные пределы значений ударной вязкости, полученных в результате испытаний при комнатной температуре. Отсюда следует, что определение ударной вязкости, произведенное лишь в условиях комнатной температуры, и в особенности в случае неоднородного материала, далеко не всегда является достаточным для того, чтобы заранее предвидеть поведение крупных деталей при действии таких ударных усилий, которые вызывают деформацию большой массы

материала. В таких случаях испытание целого изделия не может быть заменено испытанием взятых от него отдельных образцов, — что в применении к орудийным стволам приводит к необходимости взрывной пробы. Эта проба имеет значение не только в применении к орудийным стволам, но она является весьма поучительной и в отношении приобретения опыта по металлургическому производству вообще крупных поковок высококачественной стали в том случае, когда последние должны обладать высокой однородностью.

Неоднородность металла поковок, приводящая к неудовлетворительным результатам взрывной пробы, несмотря на вполне еще приемлемую ударную вязкость, обусловливается дефектами термической обработки, ковки и т. д. Но нередко причину этой неоднородности следует искать в самом производстве стали, т. е. в ликвации, скоплении неметаллических включений, недостаточном раскислении и, в особенности, в неполном удалении газов.

Для удаления усадочной раковины и наиболее загрязненной сегрегацией части, от слитка качественной стали отрубается ок. 1/3 от головной части и ок. 1/10 от донной части. Однако, некоторая разница в химическом составе головной и донной части после этого все еще остается, —даже в случае хорошо раскисленной, спокойной стали. Но, поскольку эта разница не выходит из узких границ, она не представляет опасности, обусловливая лишь незначительное и при том плавно изменяющееся по высоте слитка различие между механическими свойствами головной и донной части.

Иначе обстоит дело, если происходит образование местной, сильно выраженной зональной или внутрикристаллической сегрегации. Эти участки служат причиной неоднородности и местной хрупкости материала. Поэтому высококачественная сталь должна удовлетворять требованию возможно малого содержания фосфора и серы, обладающих сильной склонностью к сегрегации (ликвации).

Избежать полностью микроскопически мелких неметаллических включений в стали не представляется возможным, но, поскольку они имеются в незначительном количестве, их следует считать безопасными. Наличие же крупных шлаковых включений или значительное местное скопление мелких включений и дефектных участков является признаком недостаточной чистоты стали и может послужить причиной образования трещин (рис. 117).

В особенности важное значение имеет возможно большая полнота раскисления, чистота в смысле отсутствия продуктов раскисления и удаление газов. Дефекты стали, вызванные этими причинами, не могут быть обнаружены путем обычного химического анализа и нередко ускользают даже от металлографического анализа. Эти дефекты могут

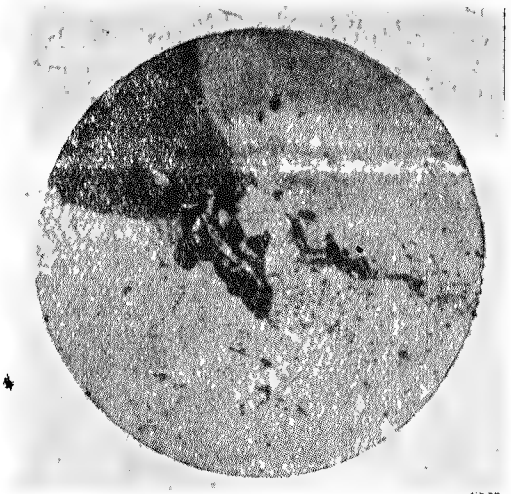


Рис. 117. Образование трещин в месте скопления мелких дефектов
Ув. 100, ум. на $^3/_5$

привести либо к порче всей массы изделия в целом, — и тогда они будут обнаружены посредством ударной пробы, — либо к образованию местных неоднородностей, следствием которых является развитие хрупкости материала местного же характера. В отношении указанных металлургических вопросов перед современной наукой стоит ряд важных, неразрешенных еще задач, и поэтому в области производства и обработки качественных сталей до сего времени решающее значение сохраняет опыт и умение сталеделательных заводов. Доверие к качеству работы металлургического завода продолжает играть свою роль и не может быть полностью заменено только методами контрольных испытаний при приеме.

Германские заводы — Круппа (Эссен) и рейнский металлический (Дюссельдорф) — в довоенное время изготовляли орудийную сталь даже для стволов крупного калибра тигельным способом, несмотря на его дороговизну, по той причине, что этот способ лучше, чем всякий другой метод производства стали, обеспечивал наиболее успешные результаты в отношении полноты раскисления, чистоты стали и освобождения ее от газов. Громадная потребность в стволах, возникшая во время войны, не могла быть покрыта тигельной сталью, и поэтому пришлось перейти к мартеновскому способу. Заводам удалось и при этом способе выплавки овладеть валовым производством стали, безупречной в отношении ударной вязкости. Полученный при этом опыт оказался весьма ценным для производства крупных слитков качественной стали, применяемой в других отраслях техники.

Особенно чистая качественная сталь может быть получена в мартеновских печах посредством дуплекс-процесса, при котором чистая заготовка, выплавленная в основной печи, загружается затем в кислую печь, где она выдерживается длительное время при возможном минимуме реакций, происходящих в ванне, так что в результате получается хорошее раскисление и удаление газов. Этот способ с особо значительным успехом был разработан Бохумским сталеделательным заводом. В интересах возможно полного раскисления стали, полезное влияние может оказать также присадка небольшого количества ванадия или титана, но не в качестве легирующих примесей, а как средства, служащего для рафинирова-

ния стали. При производстве орудийной стали всегда следует иметь в виду, что важнейшей задачей является получение металла наибольшей возможной чистоты.

Способы разливки высококачественной стали также требуют дальнейшего усовершенствования, так как даже в тщательно раскисленной стали могут вновь образоваться продукты окисления и произойти обогащение газами, если она в виде тонкой струи находится длительное время в соприкосновении с воздухом. Для избежания этого влияния, а также для возможно полного удаления газов, представляется целесообразным производить разливку высококачественной стали в вакууме. Однако, подобный способ в применении к крупным слиткам является еще пока технически не осуществимым.

Г. Заключение

К выбору и оценке сталей для изготовления орудийных, пулеметных и винтовочных стволов следует подходить как с точки зрения повторного действия рабочих напряжений при стрельбе, так и с точки зрения учета возможного развития случайных напряжений, превосходящих по своей величине напряжения, предусмотренные расчетом.

Под р а б о ч и м и н а п р я ж е н и я м и разумеются напряжения в стенке ствола, отвечающие конструкционному давлению газов, величина которого принимается за основу при расчете предела упругого сопротивления ствола. Процесс износа канала, являющийся следствием воздействия потока горячих пороховых газов и трения снаряда, обусловливает требование высокого предела текучести и высокого сопротивления истиранию в условиях температур, развивающихся при стрельбе. Для изготовления винтовочных стволов вполне пригодна углеродистая сталь, подвергнутая операции улучшения. В отношении орудийных стволов малого калибра, подвергающихся умеренному давлению газов, примерно до 2300 *кг/см*^{2} (полевые пушки средней мощности и т. п.), требование к пределу текучести может быть удовлетворено путем применения углеродистой или малолегированной стали, если только не предъявляется повышенного требования к живучести. Предел текучести, требующийся от материала, служащего для изготовления ляйнеров к орудиям высокой мощности, а в особенности для стволов крупного калибра, может быть обеспечен лишь путем применения специальных сталей (хромистых, хромомолибденовых, хромоникелевых и т. п.), которые представляют также значительные преимущества и в отношении повышения живучести орудий типа полевой пушки. Точно так же особо высокого качества специальная сталь, обладающая устойчивым пределом теку-

чести в условиях высокой температуры, требуется для изготовления пулеметных стволов с воздушным охлаждением, подвергающихся значительному нагреву при стрельбе.

Чрезмерно высокие напряжения могут возникнуть в стенке ствола при действии давления газов, превосходящего конструкционное давление, либо вследствие применения ненормально большого заряда, либо в результате разрыва снаряда в канале,— причем особенно значительное влияние оказывает, очевидно, вторая причина. Возможность возникновения этих напряжений обусловливает требование высокой вязкости материала, с целью максимального обеспечения ствола от разрыва и связанной с этим опасности для обслуживающего персонала. Сочетание вязкости, гарантирующей от разрыва, с необходимой величиной предела текучести, может быть достигнуто только в улучшенных легированных сталях, из которых первое место в этом отношении занимают никелевые стали. Другое требование, вытекающее из возможности появления указанных случайных напряжений, сводится к обеспечению высокой однородности стали и отсутствию в ней пороков. Сосредоточение дефектов в одном месте или наличие напряжений в порочном материале может привести даже при действии нормального давления газов к образованию значительных местных пик напряжений, а следовательно и к разрыву такого же характера, как и в указанных выше ненормальных случаях эксплоатации орудия.

В то время как металлографический анализ и ударные испытания надрезанных образцов дают ценные указания в отношении поведения материала в условиях действия динамических, ненормально высоких напряжений,—обычные испытания на разрыв не позволяют сделать какого-либо заключения об ударной вязкости орудийного материала. Но и ударная проба, как метод приемных испытаний, не служит еще полной гарантией в отношении необходимой вязкости в случае разрыва ствола, так как эта проба дает представление только об отдельных небольших участках изделия и не позволяет сделать заключение о влиянии неоднородности, дефектных мест, напряжений и т. д. в целом изделии. Поэтому при выявлении ударной вязкости орудийной стали нельзя обойтись без взрывной пробы, проводимой с целыми отрезами (цилиндрами) от стволов. Этот факт показывает, что и вообще, в случае деталей больших размеров, изготовленных из высококачественных сталей, для решения вопроса о безопасности от излома при действии ненормально высоких динамических напряжений, обычная ударная проба должна быть дополнена ударным испытанием этих деталей в целом виде.

Предметный указатель

Стр.

Автофретаж 24, 41, 70
Ведение снаряда в канале . . . 111
Ведущие пояски . . . 94, 153, 158
Взрывная проба 194
Вихреобразования в газовом потоке 152
Включения в орудийной стали 197
Выколы полей 129, 134
Выкрашивание металла 154
Выплавка орудийной стали . . 198
Вязкость орудийной стали . . . 166

Газовый поток 151
Горячая обработка стали . . . 192
Грани полей, трещины . . 134, 148

Давление газов . . . . . 20, 37—43
——, конструкционное 42
——, расчет 87
Давление на боевые грани . . 159
Дефекты обтюрации 152
Дефекты стали 194
Длина ствола 92

Железо, испытания на истирание 118

Заряжание с казны 13
Затворы 13, 24, 101

Износ 105
——, винтовочные и пулеметные стволы 106
——, испытания стрельбой . . . 126
——, нарезка 157
——, орудийные стволы 129
——, порох 122
——, сетка трещин . . . 108, 129
——, температура нагрева . . . 120
——, увеличение диаметра . . . 110
——, эрозия 149

Клиновый затвор 24, 101
Ковка стволов 189
Конструктивные характеристики стволов 58

Стр.

Коррозия 119, 138, 146
Кремний в орудийной стали . 178

Ляйнеры 77
——, напряжения 81, 86
——, свободные 80, 157
——, скрепленные 78

Марганец в орудийной стали . 178
Медь, испытания на истирание 118
Молибден в орудийной стали 179
Морские пушки 17

Надрез, его влияние . . . 142, 148
Надрезанные образцы, испытания 169, 171
Наклеп 73, 74
Напряжения, в состоянии покоя 45, 61, 71
——, приведенные, вызванные скреплением 52, 62
——, приведенные, расчет 30, 35, 55, 64
——, продольные (осевые) . . 52
Нарезка 94, 157
——, глубина 96
——, профиль 96
Натяжение при скреплении 49, 59
Неоднородность стали 194
Никелевая сталь 180

Обтюрация 24, 100
Орудийная сталь . . . 14, 166, 176
Орудийные стволы, износ . . 129
——, материал 14, 166, 176
——, расчет 45, 66
——, устройство 92
Остаточная деформация . . 38, 167
Отпускная хрупкость 187
Охлаждение стволов 123

Полевые гаубицы 16
Полевые пушки 16
Поля нарезки, ширина 95
Порох 14, 97
——, влияние на износ 122

Стр.

Пороховые газы 151
——, коррозия 146
——, прорыв газов 113
——, химическое действие . . 119
Пороховая камора 97
Поршневые затворы . . 14, 26, 103
Предел упругости 39
Проволочное скрепление . 23, 157
Проницаемость закалки 182
Прорыв газов 113
Пульная оболочка 119

Раскисление стали 197

Сетка трещин . . 129, 137, 144, 197
Скрепленные стволы 22, 46
——, натяжение 49
——, остаточное расширение . 42
——, расчет 45
——, характеристики конструктивные 58
Старение 76
Ствол-моноблок, конструктивные характеристики 58
——, расчет 54
Ствольная сталь 125
Стволы стрелкового оружия . . 18
——, износ 106

Стр.

——, материал 125
——, нагрев 122, 124

Теория наибольшей деформации 29
Теория энергии формоизменения 29
Теплостойкость 127
Теплопередача в стволах . . . 122
Теплопроводность 156
Термическая обработка 192
Трение, сухое 116
Трещины, образование 137

Увеличение диаметра канала 37, 110
Углеродистая сталь 176
Ударная вязкость 170, 183,
Усталость 137

Форсирование 111

Характеристики мощности орудийных стволов 16, 17
Хром в орудийной стали . . . 178
Хромоникелевая сталь 180
Хрупкий излом 134, 168
——, испытания 169
Хрупкость при наклепе (и старении) 74, 188

Эрозия, эрозионные разрушения 105, 132, 136, 149

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
26	2 сверху	35,6 клб.	35,6-*см* калибра
114	Рис. 37	Повернут на 180°	
121	Рис. 45	Вследствие плохой приправки клише, на рисунке не видны трещины	
155	Рис. 81—83	По оси ординат пропущена надпись „Боеспособность"	
188	12—13 сверху	наклока	наклепа